

Návrh chladicího systému pro ASIC bitcoin těžební zařízení

Matyáš Jan

Sekce – STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 2. ročník
Magisterský studijní program – MATERIÁLY A TECHNOLOGIE

Abstrakt: Pod povrchem každého čipu se odehrává tichý, ale neúprosný boj s teplem. Ve spolupráci s českou technologickou firmou Braiins Systems, která dlouhodobě stojí za vývojem otevřeného těžebního softwaru a nyní i evropského ASIC hardwaru, vznikla vlastní teplo vodivá pasta na bázi keramických plniv (BN, AlN) a syntetického oleje. Pasta byla následně otestovaná, výsledky byly získány metodickým měřením teplot čipů na hashboardu (PCB) zařízení Antminer S21 v prostředí cyklického zatížení. Vlastní pasta byla porovnána s komerčně dostupnými pastami, a i přes své limity ukázala překvapivou stabilitu, vhodné fyzikální vlastnosti a také potenciál pro další vývoj.

Práce zdůrazňuje, že i zdánlivě marginální vrstva mezi čipem a chladičem může výrazně ovlivnit výpočetní výkon, spolehlivost a životnost zařízení. A právě v těchto mikroskopických vrstvách materiálů se může skrývat makroskopická síla – pro jednotlivý čip, celé zařízení i systém, který reprezentuje.

Klíčová slova: BTC, Těžení Bitcoinu, Materiál pro tepelné rozhraní, Teplo vodivá pasta, Keramická plniva, Chlazení ASIC čipů, Braiins Systems

1. Úvod

V době, kdy se svět zmítá v rostoucí inflaci, omezeních plateb, ztrátě důvěry ve státní měnu a sílící kontrole nad jednotlivcem, se Bitcoin stává tichou, ale nezlomnou alternativou. Jeho síla spočívá v jednoduchosti a nezávislosti – je to protokol, který nikomu nestraní, nezná hranice, válečný stav ani cenzuru. Neumí manipulovat, neumí diskriminovat, neumí znárodňovat hodnotu. Co je tvoje, zůstává tvoje – bez svolení kohokoliv. V tom je jeho síla. Bitcoin je návratem k důvěře, která není vázaná na člověka, ale na matematiku. Na neměnné zákony, na předvídatelný a otevřený kód. Nabízí infrastrukturu, kde může člověk bez ohledu na místo narození, stav účtu či politické okolnosti svobodně držet, posílat a chránit svou hodnotu.

Aby však mohl Bitcoin tuto roli skutečně naplnit, musí stát na spolehlivé a robustní infrastruktuře. Výpočetní výkon ASIC zařízení roste, stejně jako jejich tepelná zátěž. A právě efektivní chlazení je jedním z klíčových prvků zajišťujících stabilitu a efektivitu celé sítě. Současně ale stojíme před vážným rizikem: vývoj a výroba těžebního hardwaru je dnes silně centralizovaná – několik firem téměř v jediné části světa rozhoduje o budoucnosti těžby, a tím i o bezpečnosti celé sítě. To je stav, který je v přímém rozporu s filozofií Bitcoinu jako otevřeného, decentralizovaného a odolného systému.

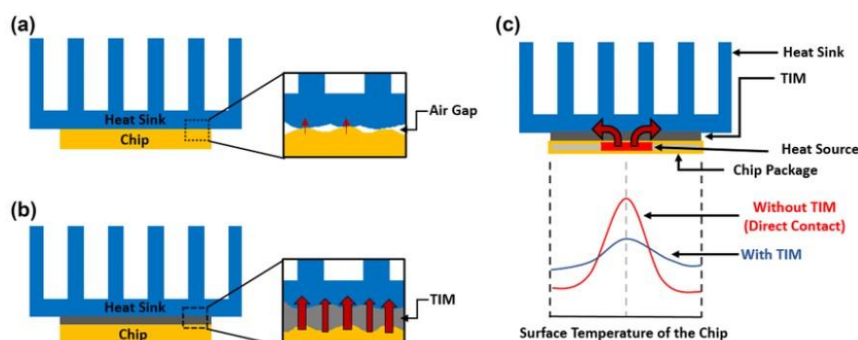
Právě proto se i společnost Braiins – partner této diplomové práce – aktivně snaží tuto rovnováhu narovnat a vybudovat první evropský ASIC miner, vyvíjený s důrazem na otevřenost, technickou nezávislost a dlouhodobou udržitelnost. Tato diplomová práce je malým, ale upřímným příspěvkem do této snahy. Vznikla z vnitřního přesvědčení, že kvalita se rodí z vytrvalosti a píle. Zabývá se zdánlivě okrajovou oblastí – přenosem tepla mezi čipem a chladičem – ale ukazuje se, že právě tato mezivrstva často rozhoduje o výkonu, životnosti i bezpečnosti zařízení. Byl navržen a otestován vlastní materiál na bázi keramických plniv, doplněný o metodiku míchání, nanášení i měření. Celý proces zahrnoval mnoho experimentů, ladění složení, optimalizaci výrobních parametrů a přímé porovnání s průmyslovými standardy. Tato práce je důkazem, že s odhodláním, nadšením a pokorou, lze přispět k něčemu většímu. Každý, kdo přispívá k rozvoji BTC infrastruktury, přispívá i k tomu, aby svět bitcoinu zůstal svobodnější i pro další generace.

2. Problém: Co se nachází mezi čipem a chladičem? TIM (Thermal interface material).

Moderní elektronické čipy (procesory, grafické čipy apod.) produkují při provozu značné množství tepla, které musí být účinně odvedeno do chladiče (heat sink), aby nedošlo k přehřátí a poškození komponenty. Ideální by bylo, kdyby čip a chladič byly v dokonalém přímém kontaktu – v praxi to však není možné kvůli mikroskopickým nerovnostem povrchů. Mezi dvěma pevnými povrchy tak vždy zůstanou drobné vzduchové mezery, a protože vzduch je velmi špatný vodič tepla, vzniká v těchto místech tepelná bariéra. Teplo by se přenášelo jen malými dotykovými plochami, kde se povrchy skutečně přímo dotýkají, zatímco v okolních vzduchových kapsách by se hromadilo. Důsledkem by bylo nedostatečné chlazení, lokální přehřívání čipu a riziko jeho poškození či snížení životnosti. [1]

Diagram ilustruje vliv teplo vodivého rozhraní: bez použití výplně (červená křivka) stoupá teplota balení čipu výrazně výše, zatímco s použitím teplo vodivého materiálu (TIM, zelená křivka) je dosaženo nižší a rovnoměrnější teploty.

Teplo vodivý materiál vyplní mezery a vytvoří tepelný most mezi čipem a chladičem, čímž výrazně zlepši přenos tepla.



Obr. 1 TIM (Thermal Interface Material), rozhraní systému čip-pasta-chladič

Tyto materiály se souhrnně označují jako TIM (Thermal Interface Material) – patří sem teplo vodivé pasty, podložky, případně lepidla či tekuté kovy. Správně zvolené a aplikované TIM minimalizuje tepelný odpor na rozhraní, předchází přehřívání a přispívá k delší životnosti součástek.[2]

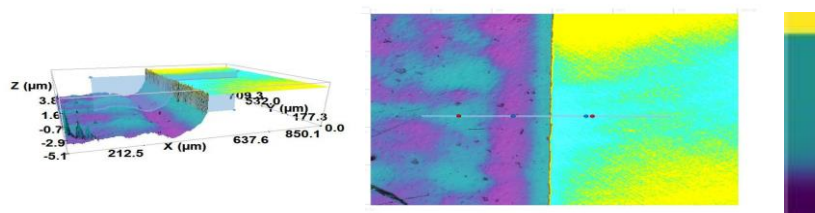
Tloušťka vrstvy by se měla pohybovat v rozmezí **50–100 μm** dle přítlačových podmínek. Nedostatečné vyplnění nerovností vede k tvorbě vzduchových mezer, které mají tepelnou vodivost pouze $\sim 0,02 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, a zvyšují tak tepelný odpor mezi čipem a chladičem.

3. Řešení: Vývoj vlastní teplo vodivé pasty

a. Analýza povrchu čipu

Zjištěné údaje ukazují, že teplo vodivá mezivrstva musí být schopna efektivně překlenout rozdíly v úrovni a vyplnit mikro prohlubně o velikosti až 9 μm. K tomu je zapotřebí zvolit takový TIM materiál, který je:

- tvárný, aby se přizpůsobil mikro geometrii,
- tepelně vysoce vodivý (min. $3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, ideálně $>5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$),
- stabilní v čase a bez degradace při tepelných cyklech,
- elektricky nevodivý

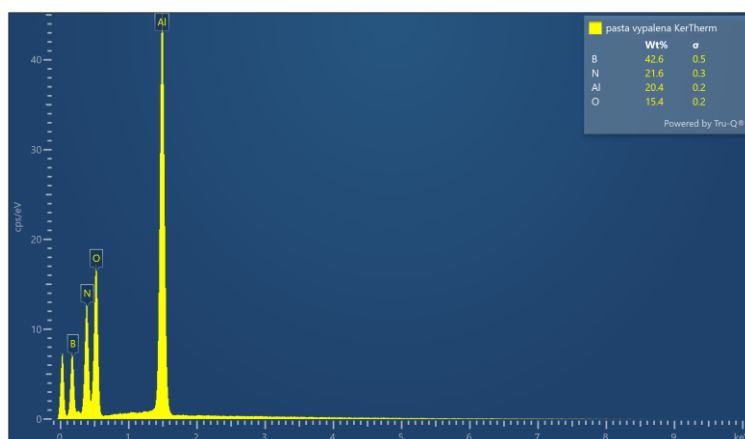


Obr. 2 Konfokální mikroskopie | Přechod čip a pouzdro

Tento typ přechodové oblasti představuje kritické místo z hlediska tepelného přenosu, protože rozdílné vlastnosti obou povrchů (drsnost, materiálové složení, přilnavost k TIM vrstvě) mohou vést ke vzniku lokálních vzduchových mezer a zvýšenému lokálnímu tepelnému odporu. Při návrhu teplo vodivé vrstvy (TIM) je proto nutné tuto výškovou nespojitost zohlednit a zajistit, aby použité médium dokázalo efektivně překlenout výškové rozdíly a zajistilo plný kontakt na obou stranách přechodu.

b. Analýza komerčních teplo vodivých past

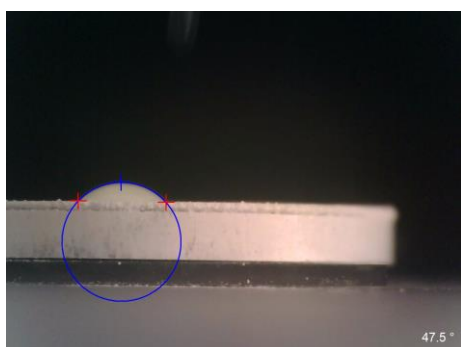
Pro ověření chemického složení komerční teplo vodivé pasty Keratherm byla použita rastrovací elektronová mikroskopie (SEM) v kombinaci s energeticky disperzní rentgenovou spektroskopií (EDX). Tato metoda umožňuje určení prvkového složení v analyzovaném místě vzorku, a je tak velmi vhodná pro identifikaci hlavních typů plniv a jejich distribuce v matrici.



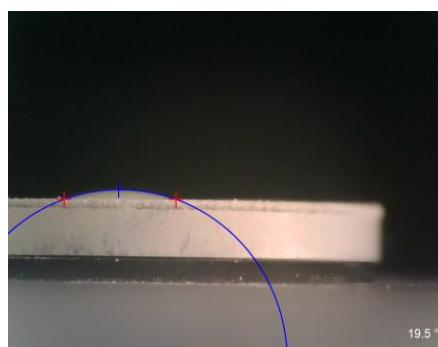
Obr. 3 EDX analýza pasta Keratherm KP12

c. Měření smáčivosti plniva AlN, BN a syntetického oleje

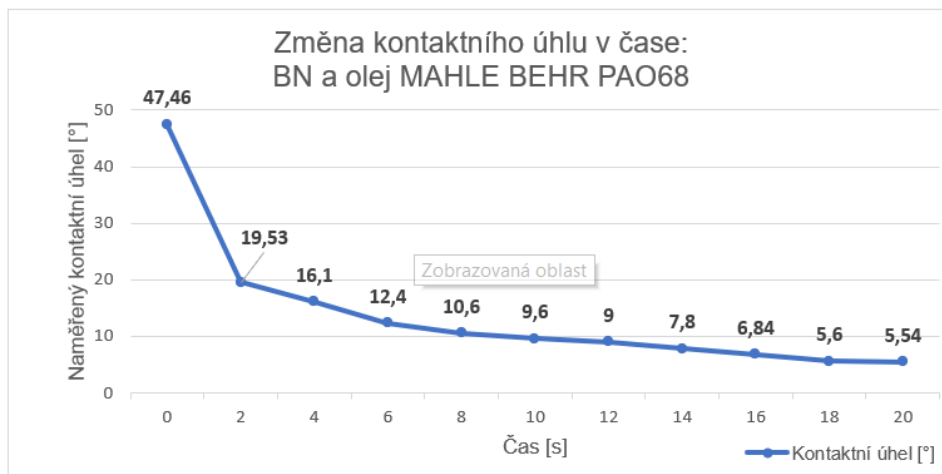
Experimentální ověření smáčivosti bylo provedeno metodou sledování změny kontaktního úhlu v čase po aplikaci kapky oleje PAO68 (MAHLE BEHR) na povrch zalisované tablety z nitridu boritého (BN). Tato metoda umožňuje vyhodnotit, jak rychle a v jakém rozsahu dochází ke smáčení pevného povrchu kapalinou.



Obr. 4 Měření kontaktního v čase 0s, BN a olej PAO68 MAHLE BEHR



Obr. 5 Měření kontaktního v čase 2s, BN a olej PAO68 MAHLE BEHR



Obr. 6 Změna kontaktního úhlu v čase BN a olej MAHLE BEHR PAO68

Takové chování je z hlediska formulace pasty velmi žádoucí – kapka, která se šíří a nezůstává sférická, značí nízké mezifázové napětí a dobrou smáčivost, což je klíčové z hlediska hmotnostního procenta AlN v celkovém objemu teplo vodivé pasty.

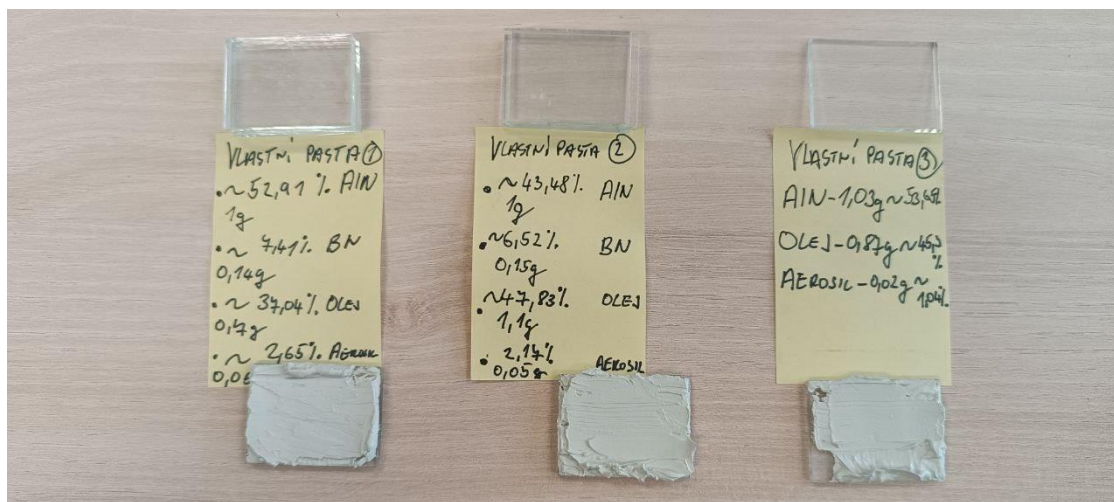
d. Postup přípravy vlastní teplo vodivé pasty

V rámci experimentální části byly připraveny tři různé varianty vlastních teplo vodivých past, které se liší složením plniv a obsahem olejové složky. Cílem bylo porovnat, jak změna složení ovlivní výsledné fyzikální vlastnosti past – konkrétně tepelnou vodivost a elektrický odpor. Dále schopnost nanášení pasty na čipy a schopnost vyplnění mikroskopických nerovnosti povrchu čipu a chladiče.

Plniva byla tvořena nitridem hlinitým (AlN), hexagonálním nitridem bóru (BN) a pyrogenním oxidem křemičitým (Aerosil), který slouží jako reologický modifikátor. Olejovým nosičem byl vysoce rafinovaný parafinický olej PAO68 (BEHR MAHLE). Všechny tři pasty byly připraveny z výchozí hmotnosti AlN 1 g, další složky byly přizpůsobeny pro vytvoření konzistence vhodné pro měření a aplikaci

Postup přípravy: Vypálení BN, Mletí, Prosévání práškových plniv, přesné vážení, předehtání oleje, Předehtání oleje, Smíchání AlN a BN, Přidání poloviny PAO oleje k práškové směsi, Přidání zbytku oleje a fumed silica do směsi, Důkladné promíchání do homogenní pasty.

Do testovací fáze byla zvolena vlastní teplo vodivá pasta č.2 z nejlepšího poměru výkonosti tepelné, elektrické vodivosti a snadnosti nanášení pasty na čipy.



Obr. 7 Vlastní teplo vodivé pasty

e. Návrh a výroba šablony na nanášení čipů

Na obr. 9 je zachycena finální podoba šablony vyrobená pomocí laseru, která byla připravena k aplikaci pasty na hashboard. Tato šablona se pokládá přímo na čipovou oblast hashboard (konkrétně dosedá svou plochou busbary) a následně slouží jako maska při roztírání, čímž je zajištěna přesnost a opakovatelnost procesu.



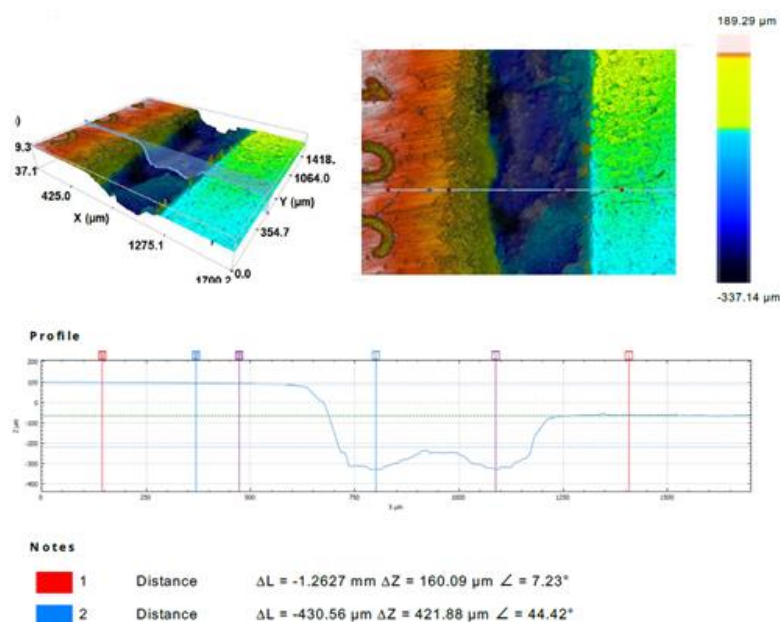
Obr. 8 Šablona vypálena pomocí laseru Creality Falcon 5W

Obr. 9 Finální verze šablony na nanášení teplo vodivé pasty

f. Zjištění rozdílu výšek mezi čipem a busbarem

Na obr. 10 je znázorněno 3D optické profilové měření rozhraní mezi výkonovým čipem a navazujícím busbarem pomocí konfokální mikroskopie. Cílem této analýzy bylo přesně určit výškový rozdíl mezi oběma komponentami – tzv. distance 1, která je klíčovým parametrem pro návrh šablony pro kontrolované a rovnoměrné nanášení teplo vodivé pasty.

Na základě profilového měření bylo zjištěno, že výškový rozdíl mezi povrchem výkonového čipu a přilehlým busbarem činí přibližně 160 μm . Vzhledem k tomu, že ideální výsledná tloušťka vrstvy teplo vodivé pasty se z praktického hlediska pohybuje v rozmezí 50–100 μm , je nutné návrh aplikační šablony tomuto rozdílu přizpůsobit.



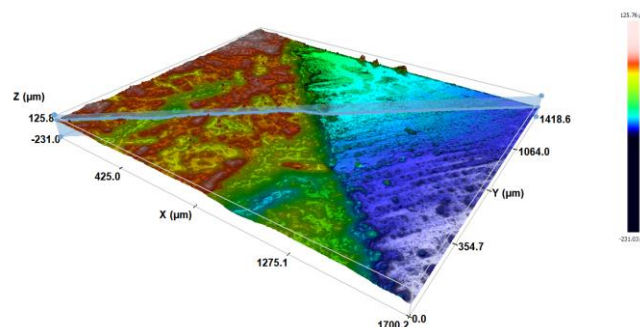
Obr. 10 Konfokální mikroskopie | Rozdíl výšek čip a busbar

g. Kontrola výšky nanesené pasty na čip

Pro ověření funkčnosti navržené šablony a přesnosti procesu nanášení byla provedena kontrola skutečné tloušťky vrstvy teplo vodivé pasty nanesené na čip. Použita byla vlastní teplo vodivá pasta č. 2, přičemž pasta byla cíleně nanesena pouze na polovinu jednoho čipu, aby bylo možné profilovým měřením přímo porovnat výškový rozdíl mezi pokrytou a nepokrytou oblastí.



Obr. 11 Nanesení vlastní teplo vodivé pasty č.2 na polovinu čipu



Obr. 12 3D optické měření vrstvy teplo vodivé pasty č.2

Rovnice (1.1) zobrazuje teoretickou výšku vrstvy nanesené pasty.

$$TVVP = \text{Šablona} - \text{Rozdíl výšky čip a busbaru} \quad (1.1)$$

Po dosazení do rovnice (3.9) byla dopočtena hodnota TVVP.

$$TVVP = 250 - 160 = 90 \mu\text{m}$$

Vypočtená hodnota **TVVP = 90 μm** spadá do požadovaného rozmezí **60–110 μm**, které je považováno za ideální pro vrstvu teplo vodivé pasty. Tím bylo ověřeno, že zvolená šablona je vhodně navržena pro aplikaci pasty na čipy BM 1368PB, které se nachází na Antminer S21 188TH/s.

4. Experiment: Metodika testování vlastní teplo vodivé pasty

a. Testování Antminer S21 v tepelné komoře

Na obr. 14 je umístěn ASIC miner Antminer S21 (188 TH/s) uvnitř komory, připojený k napájecímu zdroji a měřicí jednotce. Zařízení zde bylo testováno nejprve s originální pastou od výrobce a poté s nově nanesenou vlastní teplo vodivou pastou č. 2. Tento stroj byl vybrán hlavně z důvodu, že umožňuje načítat teplotní metriky z každého jednotlivého čipu na hashboardu. Testy probíhaly při výkonu 3 kW.

Pro vizuální analýzu provozních teplot jednotlivých čipů do tzv. Heatmap (tepelné mapy) byl vytvořen vlastní skript v jazyce Python.



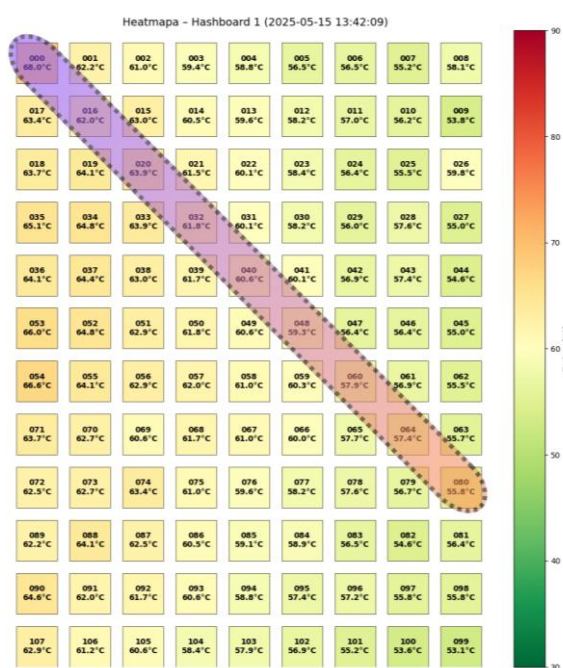
Obr. 13 Tepelná komora KEZ TUL



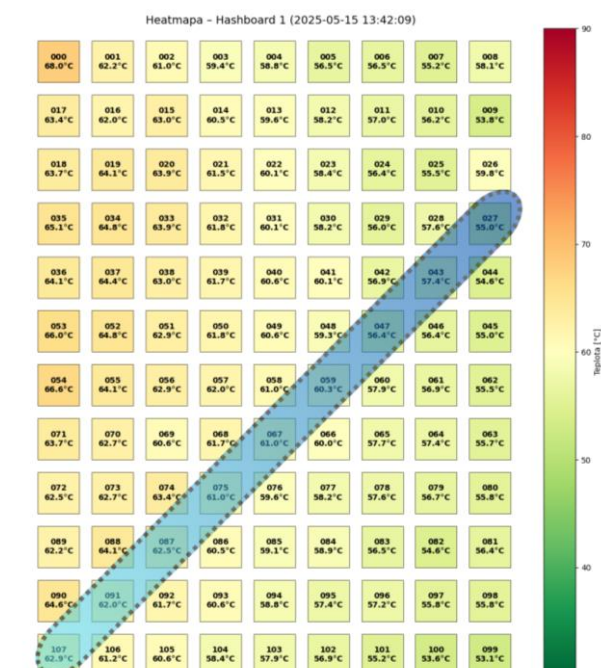
Obr. 14 Antminer S21 188 TH/s

b. Vyhodnocení teplotního rozložení čipů

Pro vyhodnocení teplotního rozložení čipů na hashboardu byly zvoleny dvě diagonály, které jsou znázorněny na obr. 15 (první diagonála) a obr. 16 (druhá diagonála). Tato metoda výběru byla zvolena záměrně, protože z plného datového souboru všech 108 čipů se při vizualizaci teplotních křivek jednotlivých čipů ve společném grafu překrývaly křivky do té míry, že nebylo možné výsledky přehledně interpretovat. Diagonální výběr zároveň umožňuje sledovat postupné teplotní změny napříč celou deskou včetně výstupních a vstupních částí, kde dochází ke kontaktním přechodům mezi napájením, chlazením a rozložením výkonu. Výběr tedy není náhodný, ale reprezentuje reprezentativní průřez napříč celým hashboardem, který umožňuje objektivně zhodnotit rozložení tepelných poměrů.



Obr. 16 Výběr čipů 1. diagonála

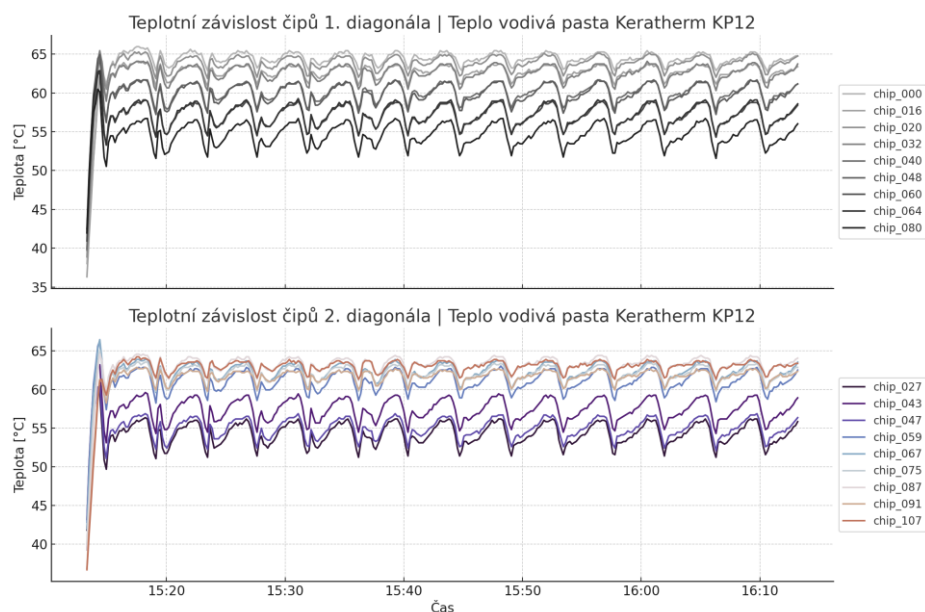


Obr. 15 Výběr čipů 2. diagonála

5. Výsledky: Teplotní průběh vybraných čipů během prvních 60 minut

Cílem tohoto testu bylo simulovat dynamické provozní podmínky, při nichž dochází ke změnám tepelného zatížení vlivem regulace chladicího systému zařízení. Tyto teplotní cykly představují důležitý parametr pro hodnocení mechanické stability a funkčnosti teplo vodivého materiálu – zejména jeho schopnosti odolávat opakované dilataci a kontrakci bez ztráty kontaktu nebo degradace struktury.

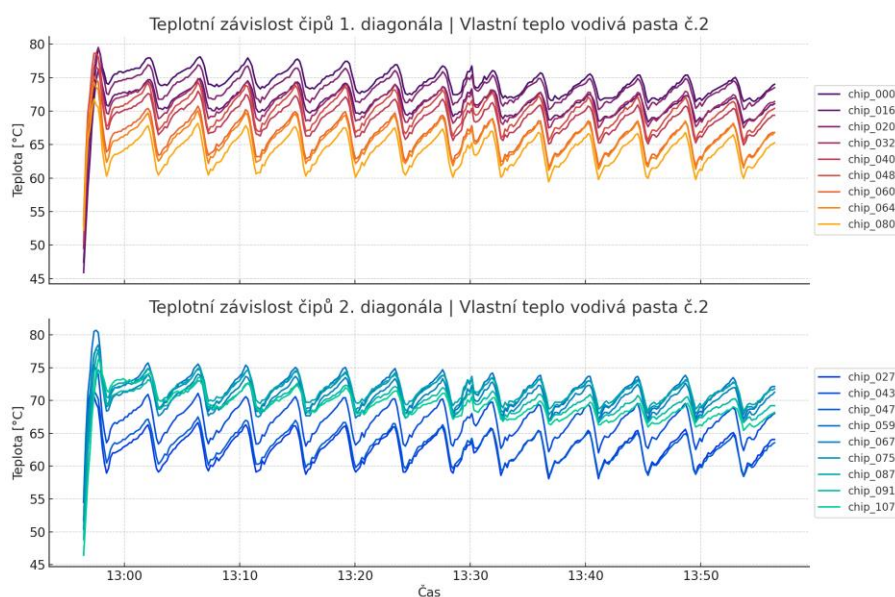
a. Komerční teplo vodivá pasta Keratherm KP 12



Obr. 17 Průběh měření | Keratherm KP 12

b. Vlastní teplo vodivá pasta č.2

Na obr. 18 je znázorněn průběh teplot na vybraných čipech v průběhu jedné hodiny provozu zařízení, při kterém byla použita vlastní teplo vodivá pasta č. 2. Cílem tohoto testu bylo ověřit teplotní stabilitu a chování vlastní pasty při reálném provozním zatížení. Z průběhu je zřejmé, že čipy vykazují typické cyklické výkyvy teplot způsobené regulací chladicí komory, jako v předchozím testování ostatních past.



Obr. 18 Průběh měření | Vlastní teplo vodivá pasta č.2

Křivky jednotlivých čipů se navzájem neprotínají a udržují konzistentní teplotní odstup, což svědčí o rovnoměrném přenosu tepla mezi čipem a chladičem a mechanické stabilitě pasty. Při porovnání teplotních rozsahů se ukazuje, že vlastní pasta č. 2 dosahuje mírně vyšších teplotních úrovní oproti originální i komerční referenční pastě Keratherm KP12, nicméně výsledky vykazují velmi dobré opakovatelné chování.

Na rozdíl od ostatních testovaných teplo vodivých past (originální S21 a komerční Keratherm KP12) vykazuje vlastní teplo vodivá pasta č. 2 výrazný **klesající trend teplot** čipů v čase. Tento jev byl pozorován jak na čípech 1. diagonály (směrem k výstupu vzduchu), tak na čípech 2. diagonály (blíže vstupu chlazeného vzduchu).

6. Závěr

Tato diplomová práce si kladla za cíl přispět k optimalizaci tepelného rozhraní mezi výkonovým čipem a chladičem v prostředí těžby Bitcoinu. Výsledkem je úspěšné složení a laboratorní ověření vlastní teplo vodivé pasty, vyvinuté na bázi keramických plniv (nitrid bóru a nitrid hlinitý) a syntetického oleje. Tato směs byla srovnána s komerčně dostupnými pastami na reálném zařízení Antminer S21 a prokázala dobrou reprodukovatelnost, mechanickou stabilitu a široký potenciál pro další ladění. Vlastní teplo vodivá pasta má v tuto chvíli i některá omezení, například v nedokonalé disperzi částic uvnitř směsi. Dále, částice BN, které byly vypáleny na vzduchu (z důvodu finanční náročnosti celého procesu), mohou do jisté míry přecházet na oxid boritý, který však má výrazně nižší hodnoty λ , než má čistý h-BN.

Současně byla v rámci této práce navržena a zrealizována kompletní metodika měření, která zahrnovala jak návrh šablony pro přesné nanášení pasty na čipy, tak i vývoj vlastního skriptu v jazyce Python pro automatizovaný sběr a vizualizaci teplotních dat ze všech čipů na hashboardu. Díky tomuto přístupu bylo možné objektivně vyhodnotit chování testovaných past v prostředí reálného cyklického zatížení a klimaticky řízené komory. Tato práce tak propojuje materiálové inženýrství (návrh, charakterizace a příprava jednotlivých složek teplo vodivých past, analýza povrchu čipů ad.), termální management (analýza a optimalizace přenosu tepla) a informační technologie (automatizace měření a zpracování dat). Jedná se tedy o multioborový přístup, kde se výsledky jednoho oboru stávají vstupem pro výzkum v oboru dalším. Hlavním přínosem této práce je vytvoření komplexního řešení, které je nejen technicky funkční, ale i otevřené pro další vývoj – ať už v oblasti teplo vodivých materiálů, open-source monitoringu nebo optimalizace chlazení těžebních zařízení.

7. Literatura

- [1] Schematic of the thermal interface material between two surfaces... *ResearchGate* [online]. [vid. 2025-04-29]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-thermal-interface-material-between-two-surfaces-aunfilled-which-have-the_fig1_361476564
- [2] SRPCO. Advantages of Thermal Interface Pads Vs. Thermal Paste | Standard Rubber Products. *Standard Rubber Products Co.* [online]. 15. červen 2021 [vid. 2025-04-29]. Dostupné z: <https://srpco.com/blogs/advantages-of-thermal-interface-pads-vs-thermal-paste/>