

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor SOČ: 2. Fyzika

Inteligentní bezpečnostní přepravní box pro nízkoteplotní přepravu
kostní dřeně a jiných biologických vzorků

Slavomír Med

Brno 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, sw atd.) uvedené v seznamu vloženém v práci SOČ.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupnění této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Brně dne

Podpis.....

Poděkování

Děkuji Mgr. Josefu Skopalíkovi a Mgr. Miroslavu Kuberovi za obětavou pomoc a podnětné připomínky, které mi během práce poskytovali.

Anotace

Cílem tohoto projektu je navrhnout, vyvinout a vyrobit prototyp chladícího boxu pro převoz kostní dřeně a jiných biologických vzorků, který bude následně testován při převozu vzorků mezi laboratořemi Ústavu biomedicínského inženýrství VUT. V případě, že se osvědčí, bude použit na testování při přepravě na větší vzdálenosti, ke kterým je předně určen.

Základní jednotkou elektroniky boxu bude platforma Arduino Uno, která je postavena na mikrokontroleru ATmega. Firmware celého boxu byl vyvinut ve vývojovém prostředí Wiring a je součástí práce.

Obsah

Úvod.....	6
1. Popis projektu.....	7
1.1. Zadání projektu.....	7
1.2. Cíle práce.....	7
1.3. Dostupné mrazící boxy.....	8
1.4. Schematický návrh boxu.....	9
2. Fyzikální principy.....	11
2.1. Vedení tepla a izolanty.....	11
2.2. Teplotní čidla.....	12
2.2.1 Platinový odporový teploměr.....	12
2.2.2 Měděné snímače teploty.....	12
2.2.3 Negastory.....	12
2.2.4 Pozistory.....	12
2.2.5 Výběr.....	13
2.3. Měření GPS polohy.....	14
3. Praktická realizace.....	16
3.1. Vývoj izolace základního boxu.....	17
3.1.1 První testy klasických polystyrenových boxů.....	17
3.1.2 Test boxu s přidanou izolací.....	19
3.2. Vývoj teploměrné elektroniky.....	21
3.2.1 Program.....	23
3.3. Vývoj finální izolace boxu a chladící náplně.....	24
4. Finální test funkčnosti.....	28
4.1. Finální test teploty a funkce teplotních senzorů.....	28
4.2. Finální doplnění elektroniky.....	31
5. Závěr.....	33

Úvod

Přeprava krve, tkání k transplantacím a jiných vzorků (např. vakcín, protilátek, krevních tekutin na stanovení diagnózy) je velmi náročným procesem, který se často realizuje mezi vzdálenými nemocnicemi. Určité krevní a jiné vzorky jsou často velmi háklivé a delší uchování v nezamrzlém stavu je nenávratně ničí. Transport a skladování takovýchto zásilek v České republice nebo jiných zemích se špičkovým zdravotnickým vybavením a logistickou sítí je dobře zvládnuta. Avšak přeprava do odlehlých oblastí planety nebo do míst, kde z různých důvodů nelze použít moderní vozidla nebo letadla s možností chlazení, je stále velmi problematická a nedokonalé vybavení s sebou často nese riziko poškození teplotou nebo i poškození mechanické. Celkově pak krev nebo tkáň dodaná ve špatné kvalitě může ohrožovat životy pacientů. Výroba přepravního boxu, který by byl vhodný k přepravě zdravotnického materiálu v těchto náročných oblastech, je cílem této SOČ.



Obrázek 1: Obtíže přepravy v odlehlých oblastech, zdroj [1]



Obrázek 2: Obtíže přepravy ve válkou zasažených oblastech, zdroj [1]

1. Popis projektu

1.1. Zadání projektu

Jak jsem již zmínil v úvodu, výsledkem této práce by mělo být navrhnutí a realizace prototypu chladícího boxu pro přepravu krve a jiných biologických vzorků. Box musí odolat poměrně hrubému zacházení, být uživatelsky přívětivý, levný a celý transport by měl být bezpečně monitorován (jak bezpečná teplota, tak GPS poloha). Tento box by měl být použitelný zejména při dálkové přepravě nebo při komplikované přepravě na nehostinná místa, kam není technicky nebo ekonomicky možné vyslat standardní přepravní vůz s mrazicí jednotkou (odlehle nemocnice v horách, těžko přístupné ostrovy, válkou či katastrofami postižené oblasti apod.).

Prototyp bude v letošním roce otestován nejprve při přepravách krevních vzorků a vzorků tkání mezi ambulancemi a laboratořemi Ústavu biomedicínského inženýrství a pakliže touto zkouškou projde, bude připraven k použití pro svůj původní účel.

1.2. Cíle práce

Cílem této práce, resp. projektu, je navrhnout a postavit prototyp přepravního boxu pro bezpečnou přepravu krevních ampulí nebo zamrazených vzorků (testovací odběry krve, odběr biopsie pro vyšetření, vakcíny pro pacienty atd.). Mezi hlavní vlastnosti tohoto boxu by měly patřit zejména tyto:

- zachování ampule v nerozmrazeném stavu po dobu minimálně 48 hodin
- chladící systém boxu by měl být zcela nezávislý na dostupnosti napájení 220V nebo přístupnosti přepravního boxu
- konstrukce boxu by měla odolat podmínkám místní dopravy v odlehlých oblastech (povozy tažené zvířaty, lodě, nákladní automobily, malá letadla) - včetně možnosti uzamknutí boxu nebo možnosti jeho dočasné úschovy mimo civilizaci, v troskách budov při přírodních katastrofách atd.
- náklady na konstrukci boxu by měli být cca do 4000 Kč, tak aby bylo možno boxy vyrobit ve větším množství i v ekonomicky méně vyspělých oblastech a tedy snadno nahraditelné při jejich poškození nebo ztrátě

1.3. Dostupné mrazící boxy

Na trhu jsou používány různé typy těchto přepravních mrazících boxů. Bohužel, většinou se jedná o drahé modely, či modely jejichž vlastnosti nemusí vyhovovat požadavkům zákazníka, který se pak následně musí omezovat dle těchto vlastností. Pro ilustraci uvádím některé nevyhovující vlastnosti:

1) Vysoká cena

Cena mrazících boxů prodávaných v dnešní době začíná v desítkách tisíc a může se vyšplhat až do stovek tisíc, přičemž ani tyto boxy nejsou ideální a mají stále některá negativa (viz. níže).

2) Nutnost vnějšího napájení

Díky vnějšímu zdroji energie pak box sice chladí, dá se říci, neomezeně dlouho. Jestliže ale chceme dopravit například vakcíny, či krev do míst zasažených katastrofou, nemusí být vnější zdroj vždy dostupný. Tím tedy nesplňují požadavek pro dopravu na jakékoliv místo.

3) Příliš malé místo pro vzorky a malá teplotní izolace

Některé boxy pak jsou určeny pouze na přepravu například zkumavek. I při tomto omezení bohužel nejsou schopny udržet správné rozmezí teploty více než několik hodin kvůli malé teplotní izolaci.



Obrázek 3: VACUETTE® Transport Container (VTC)

4) Velký objem

Na druhou stranu jsou na trhu i boxy relativně velké, které mají dostatečné chladicí vlastnosti. Velikost je však vykoupena vysokou cenou a rizikovostí poškození při přepravě nouzovými dopravními prostředky. Chladicí vlastnosti jsou podmíněny přítomností vnějšího energetického zdroje, což je taktéž podmínka ne vždy splnitelná.



Obrázek 4: B Medical Systems (Luxembourg)

1.4. Schematický návrh boxu

Vnější obal je uvnitř rozdělený na dvě části: 1.) elektronika a 2.) samotný mrazící box. Základem elektroniky je použita platforma Arduino Uno, založená na mikrokontroleru ATmega, která je doplněna teplotními čidly pro kontrolu teploty a ovládáním ventilu tekutého dusíku. Dále je k Arduino připojený GPS modul, pro možnost sledovat polohu při přepravě či snadnějšímu nalezení při ztrátě. Arduino je napájeno z baterie umístěné v jeho blízkosti, je tedy zcela nezávislé na přísunu elektrické energie zvenčí.

Druhou část vnějšího obalu tvoří polystyrenový termobox doplněný o další vrstvu vnitřní izolace a dusíkový chladič. Systém chladiče se skládá z chladiče uvnitř termoboxu, který je při běžném stavu prázdný a teprve při situacích, kdy se teplota v termoboxu blíží kritické hranici, je do něj vpuštěn

tekutý dusík z izolovaného zásobníku umístěného boku termoboxu. Tento systém tak umožňuje prodloužení trvání správného teplotního rozmezí o několik hodin.

2. Fyzikální principy

2.1. Vedení tepla a izolanty

Pro různé chladící boxy je zásadním fyzikálním jevem přenos chladu z daného zamrazeného vzorku směrem ven do prostředí, nebo fyzikálně správněji řečeno přenos tepla z prostředí na zamrazený vzorek [2,3]. Dobrý chladící box by měl zajistit co nejmenší přenos tepla, čili co nejpomalejší pronikání tepla zvenčí dovnitř a tím pádem co nejpomalejší zvyšování teploty zamrazeného vzorku v čase.

Ve fyzikální teorii i v inženýrské praxi byla zavedena veličina TEPELNÝ ODPOR a pomocná veličina SOUČINTEL TEPELNÉ VODIVOSTI, pro kterou existuje řada tabulek popisující nejrozličnější technické a stavební materiály. Součinitel tepelné vodivosti pro stěnu z daného materiálu je hodnota energie, která projde vrstvou materiálu o průřezu 1m^2 o tloušťce 1m při rozdílu teplot 1°C mezi oběma povrchy materiálu za 1 sekundu. Níže uvádím tabulku pro řadu stavebních a technických materiálů, které jsou snadno dostupné na trhu.

*Tabulka 1: Přehled materiálů,
převzato ze zdroje [4]*

Součinitel tepelné vodivosti

materiál	λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
Hliník	237
Sklo	1,35
Nylon	0,24
Ovčí vlna	0,04
Polystyren	0,033 – 0,035
Styrodur	0,032
PUR pěna	0,03
aerogel	0,015 – 0,020

Pevné materiály jako kov nebo nylon by měly výhodu z hlediska mechanické odolnosti boxu. Avšak z tabulky vyplývá jasná výhoda z hlediska tepelné vodivosti pro polystyren. Velmi dobře dostupný a poměrně levný je polystyren, ve specializovaných prodejnách je též dostupný izolační materiál Styrodur. Aerogel by byl špičkovým izolantem, cena je však vysoká.

2.2. Teplotní čidla

2.2.1 Platinový odporový teploměr

Platina se vyznačuje časovou stálostí a chemickou netečností a je tedy jedním z nejvhodnějších materiálů výroby snímače teploty. Rozmezí platinových snímačů je od -200°C do $+850^{\circ}\text{C}$ (třída B, třída A pouze do $+650^{\circ}\text{C}$, ale s větší přesností). Za největší výhodu platiny se považuje linearita odporu v závislosti na teplotě v běžných teplotních podmínkách a tedy nenáročnost na výpočty teploty. Teprve v extrémní teplotě se na tuto linearitu nelze spolehnout a nepřesnost se řeší korekcí. [5]

2.2.2 Měděné snímače teploty

Měděné snímače jsou určeny pouze pro měření v rozmezí od -200 do $+200^{\circ}\text{C}$, avšak lineární vztah lze použít pouze pro rozsah od -50 do $+150^{\circ}\text{C}$. Pro zbylý rozsah je třeba použít komplikovanější vztahy. Kromě této nelinearity mají měděné snímače další nedostatky. V porovnání s platinou mají 6x menší rezistivitu a také horší časovou stabilitu. Proto se tyto snímače používají spíše ojediněle. [5]

2.2.3 Negastory

Negastory, neboli termistory se záporným teplotním součinitelem odporu, se vyrábí obvykle z oxidů kovů a pohybují se v rozmezí od -50 do $+150^{\circ}\text{C}$. Tyto termistory jsou nelineární, což je patrně jejich největší nevýhoda, a pro výpočet je nutné vynaložit významné technologické prostředky. Naproti tomu, jejich velkou výhodou jsou malé rozměry (i menší než 1mm) a vysoká hodnota teplotního součinitele odporu. [5]

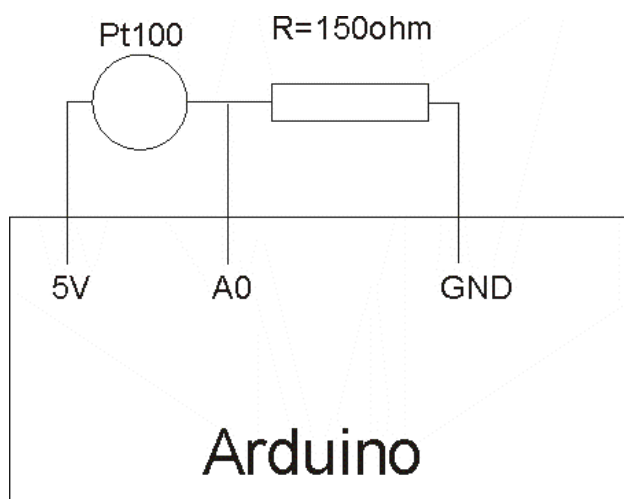
2.2.4 Pozistory

Pozistory, tj. termistory s kladným teplotním součinitelem odporu, jsou často vyráběny z titaničitanu barnatého. Jeho odpor s rostoucí teplotou nejprve mírně klesá a po dosažení Curieovy teploty začíná příkře stoupat (exponenciální funkce). Proto jsou používány hlavně jako dvoustavové senzory například pro detekci překročení nejvyšší přípustné teploty. [5]

2.2.5 Výběr

Po zvážení parametrů jsem se rozhodl použít do projektu platinové čidlo, konkrétně čidlo s jmenovitým odporem 100Ω (Pt100). Hlavním důvodem byla linearita a z ní vyplývající jednoduchost rovnice pro výpočet teploty. Druhým parametrem byla rozumná rezistivita, tak abychom se na Arduinu neocitali ve vysokých, či naopak nízkých hodnotách napětí.

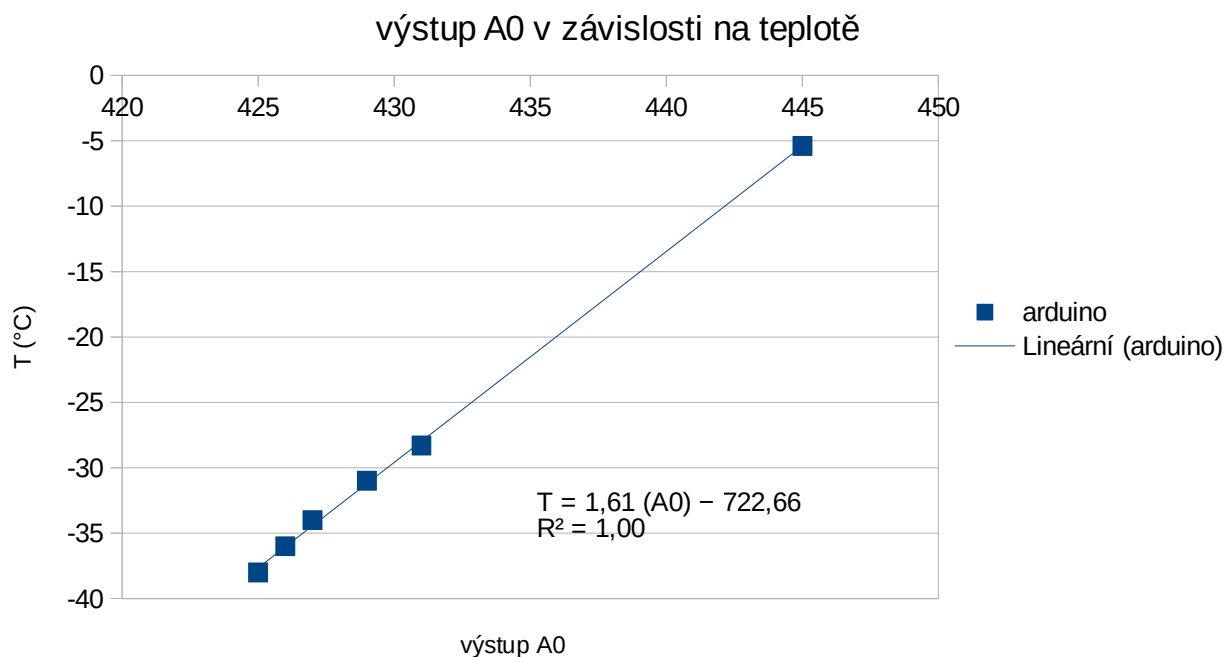
Po základním výběru Pt senzorů, jsem na základě dotazu na dostupná čidla u brněnských dodavatelů zvolil konkrétní typ SA10100609 (výrobce Cyntec Co, Ltd.). U tohoto čidla je výrobcem deklarovaná bezpečnost a funkčnost od -50 do 500°C . Praktickým měřením jsem si ověřil, že je senzor opravdu pro oblast -40 až $+30^{\circ}\text{C}$ dobře lineární. Postupoval jsem tak, že jsem si připravil obvod s Pt100 paralelně zapojeným s rezistorem ($R=150\Omega$), připojil na piny Arduina, tak abych měřil napětí na teplotním čidle (viz obrázek 5) a nechal jsem si vypisovat hodnoty na analogovém pinu A0. Dále jsem si připravil malou polystyrenovou krabici, v ní pak malý průřez pro vodiče a jeden kruhovitý otvor, jímž jsem prostrčil senzor kalibračního teploměru (GMH 3710 (výrobce Greisinger Electronic). Do boxu jsem umístil plechovku s 200ml tekutého dusíku, který postupně ochlazoval vzduch v boxu a senzor měřil teplotu vzduchu. V intervalu jedné minuty jsem zapisoval hodnoty jak kalibračního teploměru, tak hodnoty, které nám dávalo Arduino (Tabulka 2). Tyto hodnoty jsem pak vynesl do grafu. Na osu Y byly vyneseny hodnoty ve stupních Celsia a na osu X jsem nechal vynést hodnoty, čtené na pinu Arduina (graf 1).



Obrázek 5: schéma zapojení Arduina při kalibraci Pt100

t (min)	arduino	teploměr (°C)
0	459	4
1	445	-5,4
4	431	-28,3
5	429	-31
6	427	-34
7	426	-36

Tabulka 2: Kalibrace Pt100



Graf 1: Kalibrace Pt100 – graf a proložení realizováno v LibreOffice Calc

Graf nám potvrdil linearitu zakoupené Pt100 a můžeme tudíž tuto křivku považovat za kalibrační a využít tak rovnici přímky pro softwarový převod měřeného signálu z Pt100 na teplotu ve stupních Celsia při vývoji elektroniky pro záznam teploty v boxu. Zároveň tento praktický test potvrdil, že materiál senzoru i použité kabely jsou pro dané teploty odolné (po špatných zkušenostech byl místo klasických Arduino datových kabelů použit s izolací ze silikonu – kat. č SiF 0,5 výrobce Allkabel Plzeň).

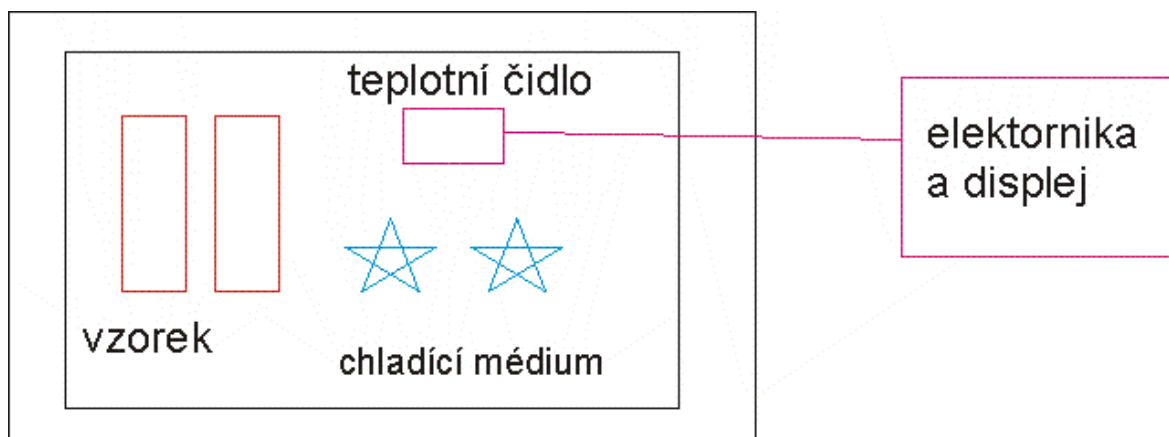
2.3. Měření GPS polohy

Globální polohovací systém (GPS) je soustava satelitů s jehož pomocí je možno určit geografickou polohu elektronického přijímače nacházejícího se kdekoli na povrchu Země s přesností jednotek metrů. Nejčastěji se uvádí poloha přijímače ve stupních zeměpisné šířky a

délky. Jako elektronický přijímač GPS signálu se v posledních letech vyrábí i levné moduly, které jsou například součástí mobilních telefonů nebo automobilů. Jeden z modulů dostupných v České republice s názvem GPS NEO-6M GYNEO6MV2 (dodavatel GM Electronics) je také možno propojit s procesorem Arduino a následně využít k nepřetržitému monitorování polohy a případně zasílání informací o poloze na určitý dispečink či kontrolní pracoviště.

3. Praktická realizace

Po prostudování technických popisů tepelných izolantů a různých komerčních přepravníků (viz. Kap. 1.3 a 2.1), které se používají v moderním zdravotnictví ve vyspělých zemích, jsem mohl navrhnout základní schéma a parametry mého přepravního boxu takto:



Obrázek 6: Základní schéma prototypu boxu

Základní požadavky a parametry, od kterých jsem se mohl odrazit, jsou:

- Vzorek (zkumavky s krví, případně vak s krví) zabírá prostor 100 až 150 ml, měl by být uložen co možná nejvíce v centru boxu a obklopen chladícím médiem. Zamrazená krev je po vytažení z mrazáku transfuzní stanice obvykle vymrazena na -40°C , nebo ještě nižší teplotu.
- Jako nízkonákladový obal s nízkou tepelnou vodivostí se nabízí standardizovaná polystyrenová krabice 35x35x28cm, kterou používá pro přepravu chemikálií např. výrobce Sigma-Aldrich.
- Čidlo teploty by mělo být co nejmenší, neměla by mu vadit vlhkost, otřesy boxu a jednoduchým tenkým kabelem by mělo být napojitelné na co nejjednodušší elektroniku (kabel ideálně protažitelný skrz stěnu boxu).
- Elektronika by měla zvládat zápis „historie teploty během přepravy“, který může sloužit jako kontrola pro lékaře v cílové destinaci, který zhodnotí, zda teplotní uchování a případné krátkodobé rozmrazení nemohlo znehodnotit zamrazený vzorek.

- Chladící médium je nezbytné, neboť, jak jsem si pilotním testem ověřil, samotný zamrazený vzorek 100ml krve se po zavření do polystyrenového boxu sice rozpouští pomaleji než na vzduchu v místnosti, ale přesto se během 3 hodin rozpustí nejméně polovina objemu zkumavek. Jako médium jsem zvolil pelety CO₂, které jsou relativně levným médiem s vysokou chladicí schopností.

3.1. Vývoj izolace základního boxu

Jak již bylo řečeno, základní stavební jednotkou toho chladícího boxu jsem vybral termobox ze šedého polystyrenu. Abychom se ujistili, že tento termobox je opravdu vhodný pro tento účel bylo třeba hned na počátku zodpovědět některé otázky:

1. Jak dlouho vydrží teplota pod nulou v termoboxu pokud jako chladící médium použijeme suchý led (CO₂)?
2. Je rozdíl, je-li stejné množství rozprostřeno po celém dně, nebo je-li nahrnut pouze na jedné polovině?
3. Dala by se použít ještě nějaká přídavná vrstva izolace, tak aby stále zbývalo dostatečné místo pro vzorky? A pakliže ano, o kolik nám prodlouží čas, kdy je teplota v termoboxu stále pod bodem mrazu?

3.1.1 První testy klasických polystyrenových boxů

Prvním testem jsem samozřejmě chtěl odpovědět na zcela základní otázku, tj. jak dlouho udrží termobox teplotu pod bodem mrazu. Připravil jsem si malé průřezy do dvou termoboxů a jimi prostrčil malý teploměr. Uvědomil jsem si samozřejmě, že i tyto malé průřezy budou představovat místo, kudy bude utíkat chlad z boxu do okolí, tzv. tepelné mosty, čímž se také sníží izolace a tedy i výdrž termoboxu a výsledky by tak nemusely odpovídat skutečnosti. Bohužel, i ve výsledném projektu bude třeba monitorovat teplotu uvnitř boxu, takže ani tam se nevyhneme tomuto úskalí. Problém lze omezit izolací vodičů a průřezu například silikonem, či polystyrenem. Odpoledne jsem do obou dvou termoboxů nasypal suchý led (pelety 10x2mm, m=800g). V jednom jsem jej rozhrnul po celém dně, zatímco v druhém jsem zhotovil přepážku z plastové mřížky tak, aby byl led pouze v jedné polovině boxu

Boxy jsem uzavřel a zapsal počáteční čas a teplotu v termoboxech, která se pohybovala kolem -50°C , i okolní teplotu, u které jsem naměřil hodnotu $23,1^{\circ}\text{C}$. Po necelých dvou hodinách jsem provedl před odchodem ještě kontrolní měření, které prokázalo, že se teplota uvnitř boxů téměř nezměnila. Druhý den, tj. po cca 18 hodinách od začátku experimentu, jsem opět zkontroloval a zapsal teploty v boxech. Zatímco v boxu, kde byl led po celém dně, teplota stoupla pouze o polovinu, tj. na $-25,9^{\circ}\text{C}$, ve druhém boxu již bylo pouhých $-12,2^{\circ}\text{C}$. Po dalších dvou hodinách jsem s údivem zjistil, že box, kde byla při posledním měření zjištěna nižší teplota se již pohybuje relativně vysoko v plusových hodnotách. Naproti tomu, druhý box se ještě stále držel pod bodem mrazu. Po dalších dvou hodinách se první box přiblížil teplotě vnějšího prostředí a i druhý box byl v plusových hodnotách. V tuto chvíli jsem již mohl experiment ukončit, neboť krevní vzorky by v tuto dobu byly již rozmrzlé, čemuž má právě termobox v praxi zabránit.

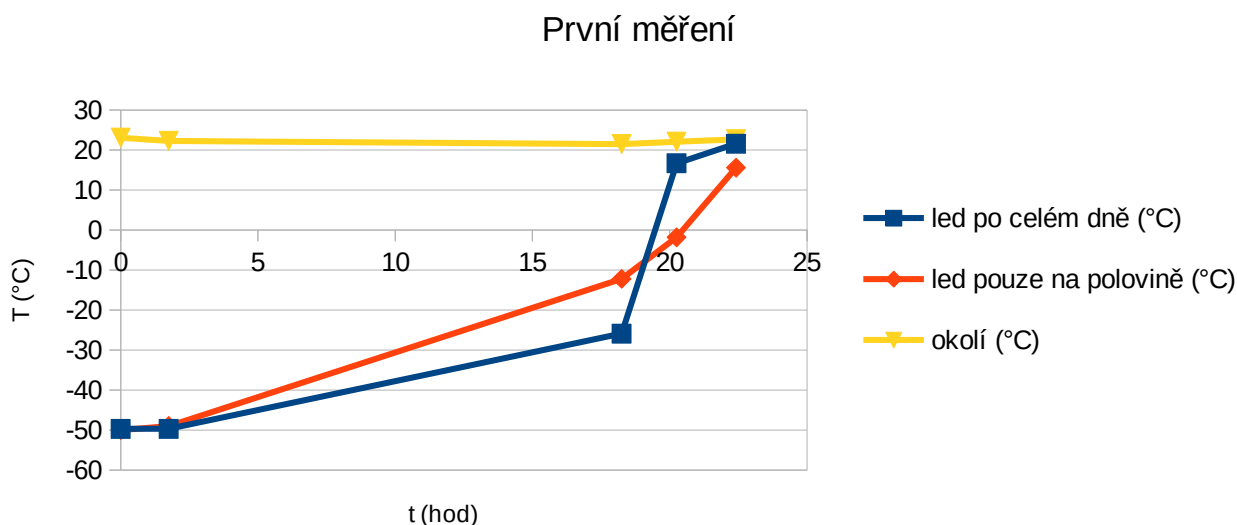


Obrázek 7: Termobox s ledem na polovině dna po 18 hodinách

Z grafu vidíme, že termobox i s tepelným mostem v podobě vodiče k teploměru udrží chlad po dobu 19,5-20,5 hodin. Dále pak, že řešení s ledem rozhrnutým po celém dně sice udrží déle nižší teplotu, než řešení s ledem pouze na polovině dna, ale v určitý moment začne teplota prudce stoupat. Rozdíl mezi časy, kdy byla teplota uvnitř termoboxů pod nulou, tedy kdy by zůstaly krevní vzorky zmražené, činí rozdíl necelé hodiny ve prospěch řešení s ledem pouze na polovině dna. Proto, pokud nebudeme používat větší množství suchého ledu, které by se nevešlo na polovinu, budeme nadále pracovat s variantou ponechat led pouze na polovině boxu.

t (hod)	led po celém dně (°C)	led pouze na polovině (°C)	okolí (°C)
0,0	-49,7	-50,0	23,1
1,8	-49,7	-49,0	22,3
18,3	-25,9	-12,2	21,5
20,3	16,7	-1,8	22,1
22,4	21,6	15,6	22,7

Tabulka 3: Prvotní měření



Graf 2: Prvotní měření

3.1.2 Test boxu s přidanou izolací

Druhý test měl za účel odpovědět na otázku ohledně přidané izolace dovnitř boxu. Jako izolaci jsem se rozhodl použít Styrodur, který má nízkou hodnotu součinitele tepla ($\lambda = 0,032 \text{ W/mK}$), o tloušťce 20mm. Při tomto testu jsem izoloval pouze postranní stěny boxu, takže dno a vršek zůstal bez izolace. Poté jsem nasypal 800g suchého ledu do takto izolovaného boxu, tak aby byl pouze na polovině boxu, čehož jsem opět dosáhl umístěním plastové mřížky, a stejně tak i do základního boxu bez přidané izolace ($m=800\text{g}$, na polovinu). Teploměr jsem připevnil na mřížku zhruba doprostřed, tak aby nebyl v přímém kontaktu s ledem. Vodič od teploměru byl opět protažen dírkou ve stěně boxu. Termoboxy jsem zavřel a zapsal počáteční hodnotu. V krabici bez izolace se teplota pohybovala kolem předpokládaných -50°C , zatímco v izolovaném boxu se teplota pohybovala již kolem -30°C , což možná bylo zapříčiněno dlouhou časovou prodlevou mezi umístěním suchého ledu a zavřením boxu. V místnosti jsem naměřil teplotu 24°C . Při druhé měření, které proběhlo po 16,5 hodinách, jsem zjistil, že ačkoliv byla v boxu s izolací na začátku experimentu o 20°C vyšší

teplota, se teplota zvýšila pouze o 10°C a měřil jsem tedy -20°C . V druhém boxu se teplota již vyšplhala na $-15,6^{\circ}\text{C}$. Další měření probíhala v intervalu 1 hodiny. Experiment jsem ukončil po 22,25 hodinách, kdy i termobox s izolací dosáhl 0°C , přičemž v krabici bez izolace bylo $18,6^{\circ}\text{C}$.

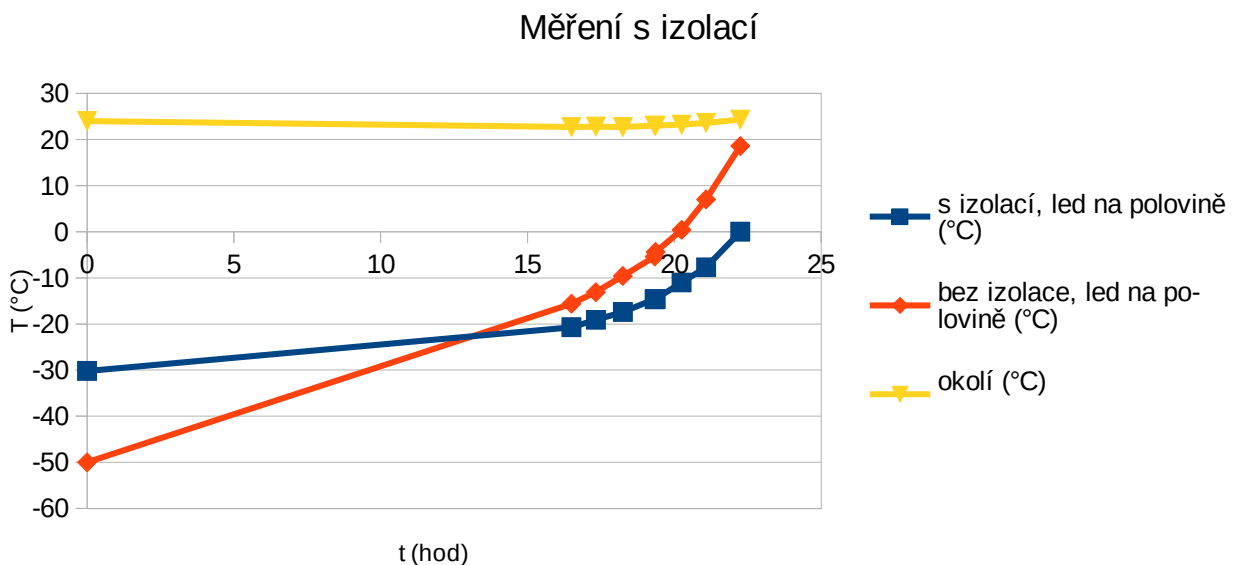


*Obrázek 8: Termobox s
přidanou vnitřní izolací po
19 hodinách*

Experiment ověřil, že přidáním takovéto izolace, lze dobu, kdy se teplota v boxu pohybuje v záporných hodnotách, prodloužit o 2 hodiny. Nutno poznamenat, že teploty na začátku experimentu nebyly stejné, z čehož vyplývá, že pokud bychom nastavili na počátku experimentu stejné teploty, rozdíl ve výsledném čase by byl možná i dvojnásobný. Díky izolaci, je tedy možné prodloužit použitelnou dobu o zhruba čtyři hodiny, což představuje asi $1/5$ původního trvání, boxu bez izolace. Proto si myslím, že i za cenu zmenšení prostoru se tato izolace vyplatí.

t (hod)	s izolací, led na polovině (°C)	bez izolace, led na polovině (°C)	okolí (°C)
0	-30,2	-50	24
16,50	-20,7	-15,6	22,7
17,33	-19,1	-13,1	22,8
18,25	-17,4	-9,6	22,7
19,33	-14,6	-5,4	23
19,37	-14,6	-4,4	23
20,25	-11	0,4	23,2
21,08	-7,7	7	23,6
22,25	0	18,6	24,3

Tabulka 4: Test s přidanou vnitřní izolací



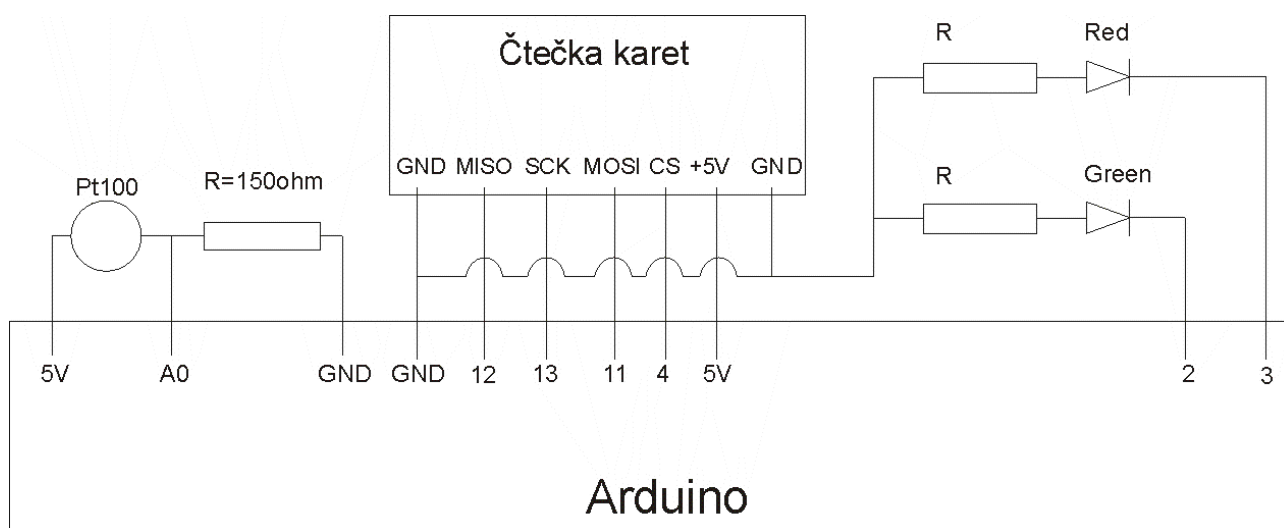
Graf 3: Test s přidanou vnitřní izolací

3.2. Vývoj teploměrné elektroniky

Jako základ elektroniky boxu jsem použil, jak jsem již zmínil v kap. 1.4, platformu Arduino Uno. Platforma je určena zejména pro studentské projekty a tak jsem našel všude mnoho rad a tipů, co a jak zapojit a naprogramovat, nejvíce mi však pomohla internetová stránka itnetwork [6], kde je celý seriál o základním programování Arduina.

Pro měření teploty se používá paralelní zapojení teploměrného čidla s rezistorem, který má nejlépe podobný elektrický odpor jako teploměrné čidlo při teplotě 25°C, aby se docílilo přiměřeného poměru napětí na rezistoru a na čidle. Měříme napětí na čidle, které pro Pt100 stoupá s rostoucí teplotou a naopak. Pro zjištění teploty ve stupních Celsia pak již zbývá pouze použít správný převodní vztah. Toto zapojení jsem připojil k Arduinu podle schématu, viz obrázek 9.

Pro zápis a ukládání dat jsem zvolil ukládání na SD kartu, která musí být naformátována do formátu fat32, do textového souboru, odkud je možné uložené hodnoty kopírovat do Excelu a získat tak graf o průběhu teploty. Zapojení jsem opět získal ze stránky itnetwork [6], viz obrázek 9. Při pokusu o úsporu místa, jsem se pokusil čtečku karet zapojit pomocí vodičů přímo do Arduina bez použití nepájivého pole, ale v takovém případě hlásilo Arduino chybu při zápisu na kartu. Přešel jsem tedy k variantě umístění čtečky do nepájivého pole, čímž jsem závadu (zřejmě špatný kontakt) odstranil. Pro kontrolu v případě, kdy není Arduino propojeno s počítačem, kde vidíme jaké hodnoty se zapisují, popřípadě zda-li se zapisují, jsem ještě přidal dvě diody, které signalizují funkčnost (zelená dioda) či nějakou chybu (červená dioda).



Obrázek 9: Schéma zapojení Arduina

Základní skript jsem zhotovil rychle podle návodu z již zmiňované stránky a zbývalo pouze odvodit výraz pro převod hodnot, které četlo Arduino z analogového pinu, na stupně Celsia. Nejprve jsem se pokusil o vyjádření v ohmech a poté přiřadit příslušnou hodnotu. To se ale moc nedařilo, takže jsem přešel na jednodušší variantu: převádět hodnotu z pinu přímo na stupně Celsia. Pro tento vztah jsem použil výsledky měření při ověřování linearity teplotního čidla Pt100 (viz kap. 2.2.5). Tím jsem tedy získal žádanou rovnici:

$$T=1,61x(A0)-722,66$$

Prozatím jsem nastavil interval pro ukládání hodnot na 30 sekund, aby bylo možno relativně rychle odhalit chybu, kdyby nějaká nastala. Pro finální verzi však použijeme interval ukládání teploty 5 min, čímž snížíme náročnost na čip a případně také na místo, se kterým ale asi problém

nebude. V tuto chvíli již byla tedy elektronika samotná připravena pro umístění do boxu a první testy.

3.2.1 Program

```
#include <SD.h>

const int chipSelect = 4;
int t=millis()/1000;
int teplota;

void setup()
{
  pinMode (2,OUTPUT);
  pinMode (3,OUTPUT);
  // nastaví seriovou komunikaci na 9600
  Serial.begin(9600);

  Serial.print("Inicializace SD karty...");

  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("/Karta nenalezena...");
    return;
  }
  Serial.println("/Karta inicializovana...");

}

void loop()
```

```
{
  teplota=analogRead(A0)*1.61-722.66;
  File dataFile = SD.open("TEST.TXT", FILE_WRITE);

  if (dataFile) {
    dataFile.print(millis()/60000);
    dataFile.print("x");
    dataFile.print(teplota);
    dataFile.println("x");

    Serial.print(millis()/60000);
    Serial.print("Zapisuji do souboru data - ");
    Serial.println(teplota);
    digitalWrite(3,LOW);
    digitalWrite(2,HIGH);
  }
  else {
    Serial.println("Chyba - nemohu otevřít soubor !!!");
    digitalWrite(2,LOW);
    digitalWrite(3,HIGH);
  }
  delay(60000);
}
```

3.3. Vývoj finální izolace boxu a chladící náplně

Po té co jsem zhotovil izolovanou verzi polystyrenového termoboxu, mohl jsem přistoupit vývoji externího boxu a jeho izolace. Polystyrenový termobox totiž nutně potřebuje ještě vnější mechanický obal, nejen z důvodu větší odolnosti, ale též z důvodů ochrany před deštěm a

bezpečného zabudování a ukrytí elektroniky a baterie. Jako externí box jsem vybral typický pojízdný box původně určený na převoz elektroniky hudební aparatury (cena v ČR kolem 2000 Kč). Je vyroben z voděodolné překližky s železným kováním, které mu přidává na odolnosti, takže by mu nemělo vadit hrubší zacházení. Jelikož výsledný box nebude předně určen na nošení v ruce kvůli své hmotnosti, byla k vnějšímu boxu připevněna kolečka. Vysunovací madlo má již z výroby, díky čemuž lze krabici táhnout za sebou podobně jako kufr. V boxu je dvojitě dno, takže ze spodní strany je box izolován od země vzduchovou vrstvou. Na tuto podlahu jsem umístil polystyrenový termobox a zhruba $\frac{3}{4}$ krabice kolem boxu jsem vyplnil pěnovou hmotou. Zbývající čtvrtinu jsem nechal volnou pro elektroniku, baterie apod.

Dále jsem se rozhodl, že vzhledem k bezpečnosti udržení mrazivé teploty po celou dobu transportu, přidám ještě nouzové chladící médium, pro případ zdržení letadla, zácpy na silnici apod. Pro tento účel jsem vybral tekutý dusík. Ten, v případě, že by se teplota blížila nule a box by ještě nebyl u cíle, by se přelil ze zásobníku umístěného vedle vnitřního termoboxu do chladiče uvnitř, čímž by se docílilo opětovného snížení teploty a tedy prodloužením doby možné pro transport, kdy vzorek krve ještě nerozmrzne.

Než jsem vybral vhodný materiál na výrobu zásobníku, bylo třeba je otestovat. Test probíhal tak, že jsem vzorky materiálů (tj. průhledná silikonová hadička, klasický spárovací silikon, plechovka (hliník), plastová nádoba (z tvrděného polyethylenu), PUR pěna (zakoupena ve spreji, typ PU Patex Universal), pěnová porézní polyesterová hmota) ponořil na deset minut do tekutého dusíku. Veškeré vzorky obstály na výbornou. Pouze pěnová hmota se stala o malinko křehčí, což se projevilo při testech ranami šroubovákem. Mohl jsem se tedy pustit do výroby samotného zásobníku.

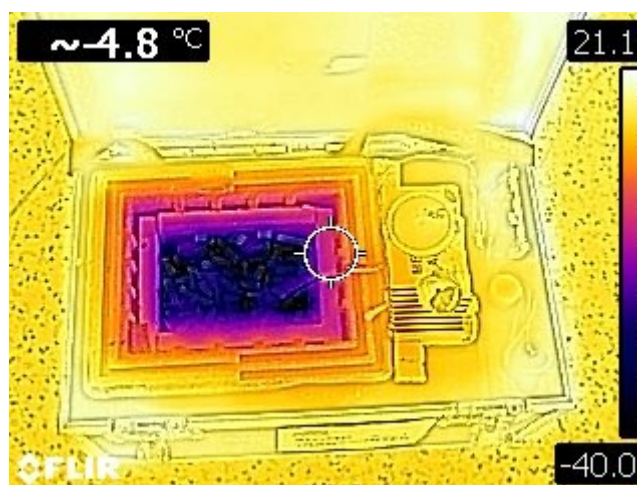
Pro vnitřní nádobu zásobníku jsem zvolil plastový kelímek, do jehož dna jsem vyvrtal díru a přilepil silikonovou hadičku pomocí gelové silikonové pasty. Poté jsem zavřený kelímek umístil do papírové krabice, zbylý objem krabice jsem vyplnil PUR pěnou a nechal schnout. Pro chladič jsem vybral hliníkovou plechovku, která velmi dobře vede teplo, což právě v tomto případě potřebujeme. Do strany termoboxu jsem vyřízl kruhovitý otvor a tím jsem pak prostrčil chladič tak aby jeho okraj byl zároveň s okrajem termoboxu. Když PUR pěna zatvrdla, ořízl jsem zásobník do požadovaného tvaru a na gumovou hadičku jsem připevnil ventil pro vypuštění dusíku do chladiče. Druhý konec ventilu jsem opět pomocí silikonu přilepil k plechovce. Abych zamezil co nejvíce tepelným ztrátám

skrz prázdný chladič, přidal jsem na vnější stranu termoboxu polystyren navíc, čímž jsem zakryl otvor, jímž chladič prostrčen a skrz něj vede pouze konec ventilu.

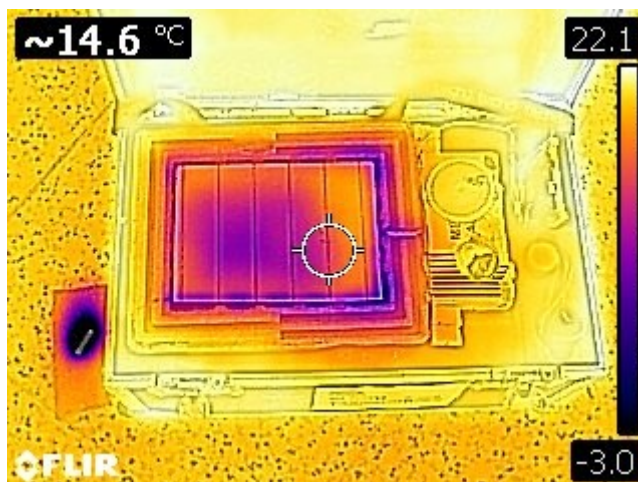


Obrázek 10: Test odolnosti vůči dusíku - průhledná silikonová hadička 2x, klasický spárovací silikon, plechovka (hliník), plastová nádoba (z tvrděného polyethylenu), PUR pěna (zakoupena ve spreji, typ PU Patex Universal), pěnová porézní polyesterová hmota

Na závěr bylo realizováno testování termokamerou, že obaly nepropouští teplo a nevykazují v některých místech skryté tepelné mosty. Použil jsem kameru typu FLIRC2, snímky jsou na obr. 9, 10, 11.



Obrázek 11: Termosnímek otevřeného boxu po uložení vzorků



Obrázek 12: Termosnímek boxu po uzavření
přidané interní izolace

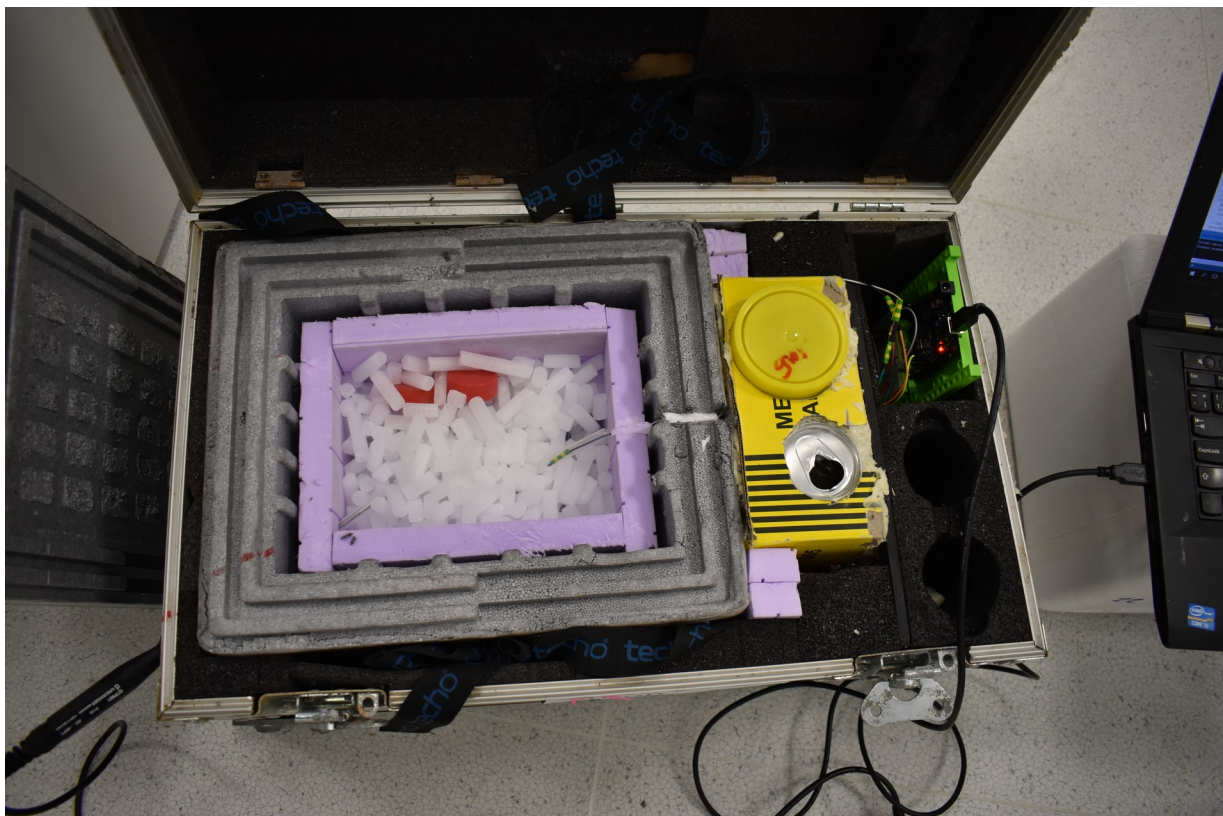


Obrázek 13: Termosnímek boxu po uzavření
termoboxu

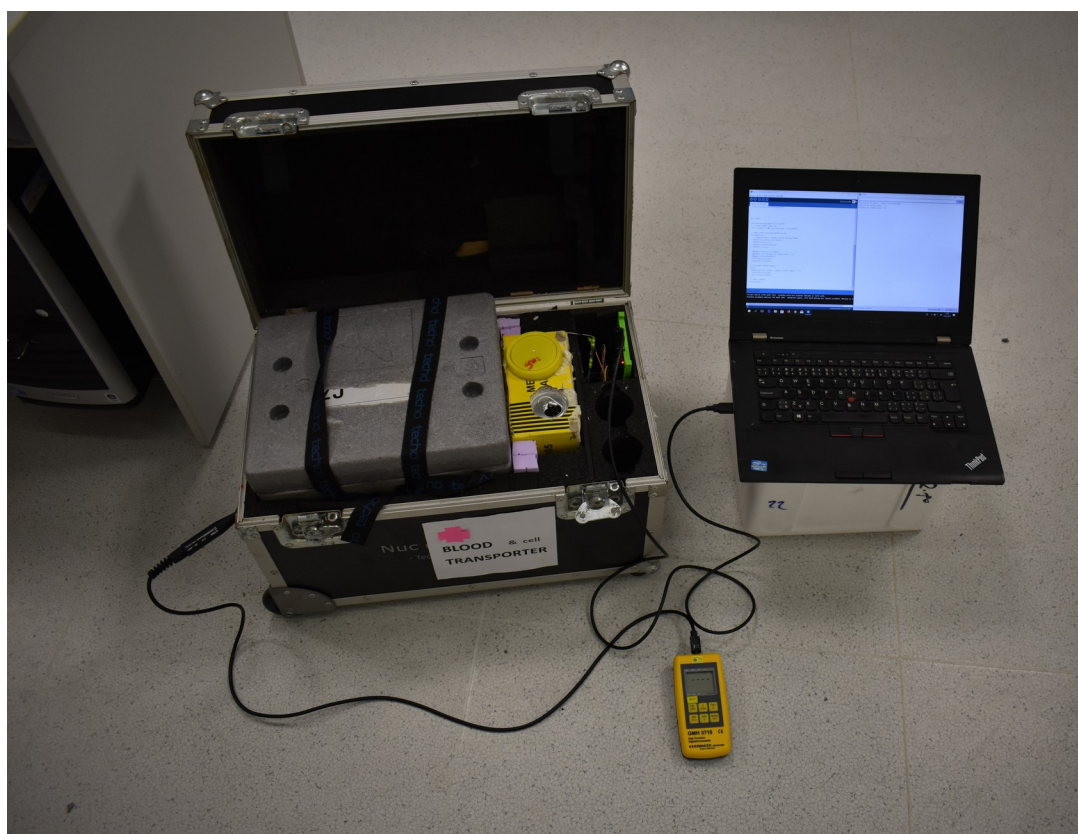
4. Finální test funkčnosti

4.1. Finální test teploty a funkce teplotních senzorů

V tuto chvíli jsem již měl celý box izolovaný a osazený elektronikou pro zápis teploty a mohl jsem se tedy pustit do finálního testu funkčnosti boxu. Pro tento test jsem navíc provrtal otvor skrz veškerou izolaci, abych mohl měřit teplotu i kalibračním teploměrem (viz. Kap. 2.2.5). Tento otvor při ostrém použití bude samozřejmě zaizolován, abychom netvořili zbytečně tepelný most. Vnitřní box byl navíc obohacen o vnitřní izolaci horní strany. Místo ampulí s krví, jsem pro tento test použil 2 ampule (každá po 50 ml) zmrzlé vody, která má podobné vlastnosti jako krev, neboť ji z většiny tvoří. Nejprve jsem pokryl dno termoboxu vrstvou ledu, poté jsem vložil ampule do svislé polohy, jak jen to podmínky dovolovaly, a dosypal i zbytek krabice suchým ledem. Vnitřní i vnější box jsem uzavřel a spustil zápis teploty.



Obrázek 14: Finální test - termobox před zavřením



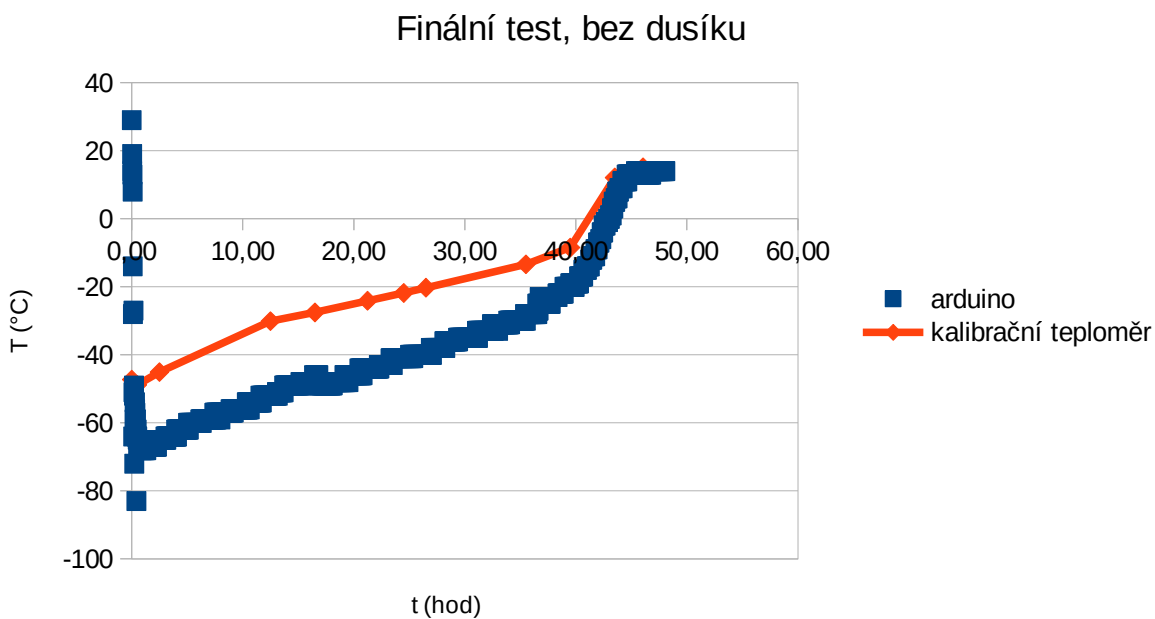
Obrázek 15: Finální test - zavřený termobox

Po ustálení teploty teploměr naměřil hodnotu $-47,3^{\circ}\text{C}$, Arduino hlásilo teplotu -67°C , v místnosti bylo naměřeno 20°C . Dále se experiment odvíjel bez mého zásahu, až na občasné odečtení hodnoty z kontrolního teploměru a testovacího kolečka po budově školy. Po 21 hodinách, kdy ve volně stojícím termoboxu již byla překročena hranice nuly, bylo naměřeno kontrolním teploměrem ještě stále $-24,1^{\circ}\text{C}$. Nuly bylo dosaženo něco málo před před 43. hodinou experimentu (podle kontrolního teploměru), avšak „krevní“ vzorky byly stále ve zmrzlém stavu. Teprve po dalších třech hodinách, tj. ve 45. hodině od začátku experimentu, kdy se teplota v boxu pohybovala kolem $+15^{\circ}\text{C}$, byly „krevní“ zkumavky z 10% rozmrazeny.



Obrázek 16: Finální test - zkušební přesun po budově školy

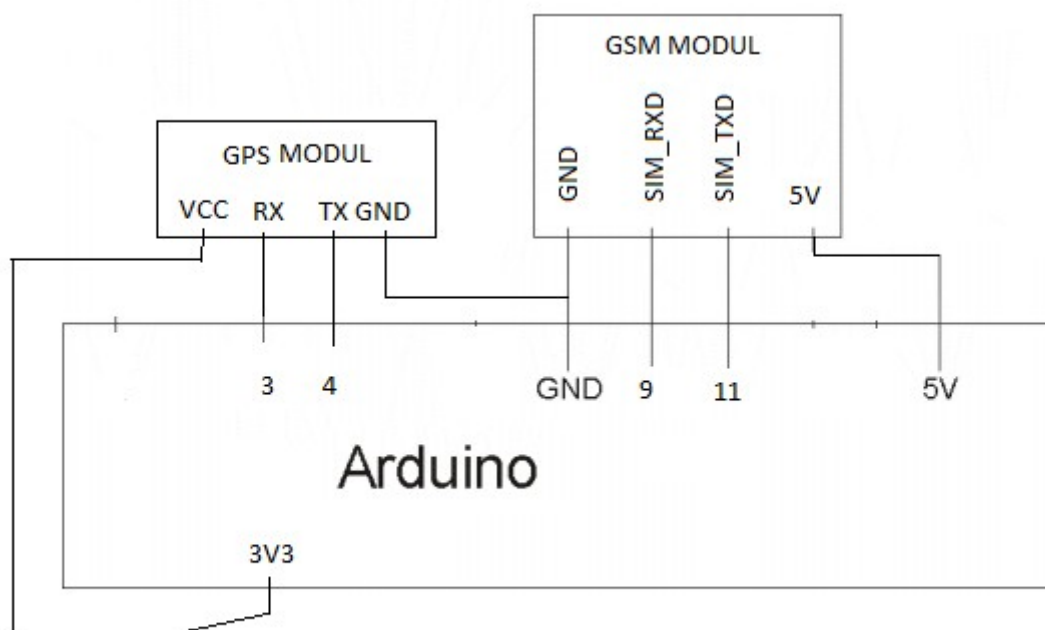
Po přechtení uložených hodnot z SD karty a vytvoření grafu, vidíme, že tvar grafu odpovídá očekávání, ačkoliv je o několik stupňů posunutý směrem dolů oproti grafu získaného z kalibračního teploměru Greisinger. Odchyłka je malá a důvodem odchyłky, není patrně špatná kalibrační křivka, ale spíše umístění teploměrů v protilehlých rozích boxu a tím pádem mírný rozdíl skutečné teploty v těchto lokacích boxu. Při dalších podrobnějších testech tedy budou použity ještě dodatečné teploměry pro zmapování více bodů v boxu.



Graf 4: Finální test - teplota

4.2. Finální doplnění elektroniky

Jak již bylo uvedeno v teorii v úvodu, velmi žádoucí je doplnit přepravní box o GPS modul a zařízení pro oznamování polohy. Konkrétně byl vybrán modul GPS NEO-6M GYNEO6MV2 a modul GPRS GSM Modul SMS/A6/Speech/Bboard/Wireless. Hlavními důvody byly jejich malé rozměry, které jsou vhodné pro nevelké vnitřní prostory boxu. Modul GPS je důležitý pro průběžné kontroly přesunu boxu po trase k pacientovi, ale také pro rychlý nález boxu například v případě nutnosti nouzového vyskladnění mimo silnice nebo při odcizení boxu nebo celého dopravního prostředku. Blokové schéma zapojení těchto modulů k desce Arduino je na obrázku 14. Zařízení je navrženo tak, aby uložilo GSM polohu na datovou kartu Arduina každých 20 minut a jednou za 40 minut byla odeslána na kontrolní GSM stanici textová zpráva obsahující GPS souřadnice dvou posledních výskytů boxu. Dále při odtržení pečeti na zámku boxu je odeslána textová zpráva s GPS polohou ihned v daném čase.



Obrázek 17: Schéma zapojení GPS a GSM modulů

Při použití modulů se vyskytly některé komplikace jako reset Arduina v důsledku vysílání GSM modulu a špičkovému odběru. Proto musely být antény modulů dobře odstíněny hliníkovým plechem. Ve finálním provedení jsem také použil pro jistotu zvláštní napájení pro modul a zvláštní pro procesor Arduina.

Místo GSM modulu jsem uvažoval při vývoji boxu i o modulu pro satelitní spojení nebo o modulu pro připojení k síti Sigfox (jedna z nových sítí pro tzv. internet věcí). První z nich má ale nevýhodu nutnosti přímé viditelnosti (viditelnost na oblohu), druhá varianta má zase nevýhodu nízkého pokrytí v rozvojových zemích.

A úplně posledním technickým doplňkem bylo dořešení napájení. Elektronika na cestách nemůže být napájena síťovým adaptérem nebo z USB počítače. Použití boxu na cestách nese podmínku použít baterii o rozumné kapacitě a současně o rozumné hmotnosti a ceně. Po průzkumu výrobků na současném trhu se jako nejlepší volba jevila některá z 5Ah power-bank obsahující standardní levnou Lithiovou nabíjecí baterii. Vybral jsem nakonec typ Extreme XMP102 QUARK. Hlavním důvodem použití této power-bank je fakt, že je malá a obsahuje bezpečnostní obvod pro případ zkratu (což obyčejné samotné Li-Ion baterie nemají a riziko zkratu a zahoření při havárii dopravního prostředku by tak nebylo bezpečně podchyceno). Tato power-bank dle testů může bez problémů napájet navržené zařízení po dobu minimálně 8 dní.

5. Závěr

Přeprava kostní dřevě, krve nebo jiných vzorků pro pacienty je v odlehlých a válečných oblastech těžko řešitelný problém. Práce se zaměřila na konstrukci chytrého termoboxu, který by uměl dlouhodobě uchovat cca 100-200 ml vzorku a který by byl vybaven chytrou elektronikou (monitoring teploty, ukládání teplotní křivky, monitoring GPS souřadnic)

Po prostudování literatury a webů ohledně současných přepravních boxů, bylo cílem první fáze navrhnout jednoduchý prototyp využívající standardní polystyrenovou krabici pro zasílání chemických vzorků. Box byl osazen teploměry a byly zhodnoceny jeho izolační vlastnosti. V druhé fázi byl box doplněn o masivní vnější izolaci, k tomu účelu byl upraven starší obal od zvukové aparatury. Izolační vlastnosti ukázaly výborné hodnoty, box dokázal uchovat vzorky pod nulou po dobu 43 hodin bez nouzového ochlazení tekutým dusíkem. Teploměrná elektronika byla zhodnocena pomocí přesného kalibračního teploměru. Na závěr box prošel i mechanickým testem odolnosti.

Nyní je plánováno testování při rutinních převozech zamrazených vzorků na VUT (reálný provoz v MHD v rámci města Brna, transport na korbě dodávky atd) a pokud se osvědčí mohl by být použit v reálné praxi v cílových zemích.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Obtíže přepravy v odlehlých oblastech, zdroj [1].....	6
Obrázek 2: Obtíže přepravy ve válkou zasažených oblastech, zdroj [1].....	6
Obrázek 3: VACUETTE® Transport Container (VTC).....	8
Obrázek 4: B Medical Systems (Luxembourg).....	9
Obrázek 5: schéma zapojení Arduina při kalibraci Pt100.....	13
Obrázek 6: Základní schéma prototypu boxu.....	16
Obrázek 7: Termobox s ledem na polovině dna po 18 hodinách.	18
Obrázek 8: Termobox s přidanou vnitřní izolací po 19 hodinách	20
Obrázek 9: Schéma zapojení Arduina.....	22
Obrázek 10: Test odolnosti vůči dusíku - průhledná silikonová hadička 2x, klasický spárovací silikon, plechovka (hliník), plastová nádoba (z tvrzeného polyethylenu), PUR pěna (zakoupena ve spreji, typ Universal), pěnová porézní polyesterová hmota.....	26
Obrázek 11: Termosnímek otevřeného boxu po uložení vzorků..	26
Obrázek 12: Termosnímek boxu po uzavření přidané interní izolace.....	27
Obrázek 13: Termosnímek boxu po uzavření termoboxu.....	27
Obrázek 14: Finální test - termobox před zavřením.....	28
Obrázek 15: Finální test - zavřený termobox.....	29
Obrázek 16: Finální test - zkušební přesun po budově školy.....	30
Obrázek 17: Schéma zapojení GPS a GSM modulů.....	31

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled materiálů, převzato ze zdroje [4].....	11
Tabulka 2: Kalibrace Pt100.....	14
Tabulka 3: Prvotní měření.....	19
Tabulka 4: Test s přidanou vnitřní izolací.....	21

Seznam grafů

Graf 1: Kalibrace Pt100 – graf a proložení realizováno v LibreOffice Calc.....	14
Graf 2: Prvotní měření.....	19
Graf 3: Test s přidanou vnitřní izolací.....	21
Graf 4: Finální test - teplota.....	30

Seznam použité literatury

1. Zdeněk Novotný, Logistika: měsíčník pro dopravu, skladování, distribuci a balení: měsíčník Hospodářských novin. Praha: Economia, 11/2016 ISSN 1211-0957
2. Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., Dub, P., & Černý, M. (2013). Fyzika. Vutium.
3. Bartuška Karel, Soboda Emanuel, Fyzika pro gymnázia 4.vyd., Praha: Prometheus, 2001
4. <http://www.izolant.cz/tepelneizolacni-vlastnosti-izolacnich-materialu-a-jejich-porovnani/>
5. Kopejska, Michal, et al. Odporové snímače teploty na flexibilních substrátech, 2017
6. <https://www.itnetwork.cz/hardware-pc/arduino/arduino-sd-karta>