



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM SMĚSÍ PROTI TVORBĚ NÁMRAZY TROLEJOVÝCH VEDENÍ

EXPERIMENTAL RESEARCH OF FLUIDS AGAINST ICING OF OVERHEAD WIRES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Málek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radovan Galas, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. Jan Málek
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Radovan Galas, Ph.D.
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 diplomové práce:

Experimentální výzkum směsí proti tvorbě námrazy trolejových vedení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Námraza trakčních a trolejových vedení každoročně paralyzuje kolejovou dopravu v mnoha zemích, což způsobuje významné ekonomické ztráty a dopravní chaos. Jedním ze způsobů, jak těmto nežádoucím situacím zabránit, je aplikace tzv. anti-icing a de-icing směsí, které zabrání popř. odstraní již vzniklou vrstvu námrazy. Ačkoli na trhu existuje několik zařízení pro preventivní ošetření trolejových vedení, jejich využití je omezené. Problém představuje zejména včasná identifikace hrozby tvorby námrazy a také skutečnost, že směsi zpravidla nejsou primárně vyvíjeny pro danou aplikaci.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem práce je experimentálně popsat vliv složení protinámrazových směsí na tvorbu námrazy a tribologické vlastnosti kontaktu sběrače pantografu a drátu trolejového vedení.

Dílní cíle diplomové práce:

- rešerše aktuálních vědeckých poznatků o chování směsí proti tvorbě námrazy,
- návrh experimentální metodologie laboratorního výzkumu,
- návrh a realizace experimentálního zařízení pro studium námrazových jevů trolejových vedení,
- experimentálně popsat vliv složení směsí na tvorbu námrazy a tribologické vlastnosti kontaktu,
- analyzovat výsledky a připravit podklady pro publikaci.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

LAFORTE, J.L., M.A. ALLAIRE a J. LAFLAMME. State-of-the-art on power line de-icing. Atmospheric Research. 1998, 46(1-2), 143-158. DOI: 10.1016/S0169-8095(97)00057-4.

PERPINYA, X. Reliability and Safety in Railway. InTech. 2012, 295-314. DOI: 10.5772/2660.

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT A KLÍČOVÁ SLOVA

V rámci této práce byly testovány komerčně dostupné směsi proti námraze. K tomu byla navržena metodika hodnocení vlivu testovaných směsí na rychlost růstu námrazy a její vývoj v čase. Tyto testy pak probíhali na testovacím zařízení zkonstruovaném v rámci této práce. U hodnocených směsí byl měřen vliv na adhezi ledu k trolejovému drátu. Byl také popsán vliv těchto směsí na tribologické chování kontaktu sběrače a troleje. Experimenty byly doplněny o měření velikosti kontaktního úhlu směsí na povrchu trolejového drátu. Výsledky ukazují, že testované směsi mohou snížit množství vzniklé námrazy na povrchu troleje. Tento efekt je však poměrně krátkodobý. Naopak se ukázalo, že i velmi malé množství směsi na povrchu trolejového drátu může vést k výraznému poklesu adheze námrazy.

Klíčová slova: trolej, námraza, protinámrazová směs, ledovka,

ABSTRACT AND KEYWORDS

In this thesis, commercially available anti-icing fluids were tested. A methodology of assessment was designed for the effect of anti-icing fluids on the rapidity of ice growth and its development over time. These tests were conducted on a device constructed for the purpose of the thesis. The solutions were tested for their effect on the ice adhesion to a contact wire. The effect of the solutions on the tribological behaviour of the collector strip and contact wire was described. The experiments were supplemented by mensuration of the size of the contact angle of the solutions on the copper surface. However, these fluids anti-icing effect is relatively short-term. On the contrary, the thesis shows that even a small amount of anti-icing solution on the surface of the contact wire can help to significantly lower the ice adhesion.

Keywords: contact wire, catenary, anti-icing, de-icing, icing, rime, ice

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MÁLEK, Jan. *Experimentální výzkum směsí proti tvorbě námrazy trolejových vedení*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124839>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Radovan Galas.

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	16
2.1	Technologie pro odstranění a ochraně trolejí před vznikem námrazy	16
2.1.1	Mechanické metody	17
2.1.2	Termální metody	18
2.1.3	Chemické metody	18
2.2	Rizika a následky námrazy trolejových vedení	20
2.3	Problematika styku sběrače a troleje	21
2.3.1	Sběrač	21
2.3.2	Trakční vedení	22
2.3.3	Kontakt sběrač trolej	23
2.4	Směsi proti tvorbě námrazy	29
2.5	Námraza	35
2.5.1	Typy námrazových příbuzných jevů	35
2.5.2	Vznik námrazových a příbuzných jevů	37
2.5.3	Fyzikální model růstu námrazy	39
2.6	Zařízení pro zkoumání námrazových jevů	41
2.7	Adheze námrazy k povrchu pevných těles	44
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	46
3.1	Analýza problému	46
3.2	Analýza a zhodnocení rešerše	46
3.2.1	Tribologie kontaktu-sběrač trolej	46
3.2.2	Termodynamický systém vzniku námrazy	48
3.2.3	Směsi proti námraze	49
3.3	Cíl práce	51
4	MATERIÁL A METODY	53
4.1	Postup řešení	53
4.2	Materiál	54
4.2.1	Směsi proti námraze	54
4.2.2	Trolejový drát	55
4.2.3	Náhrada smýkadla sběrače	55

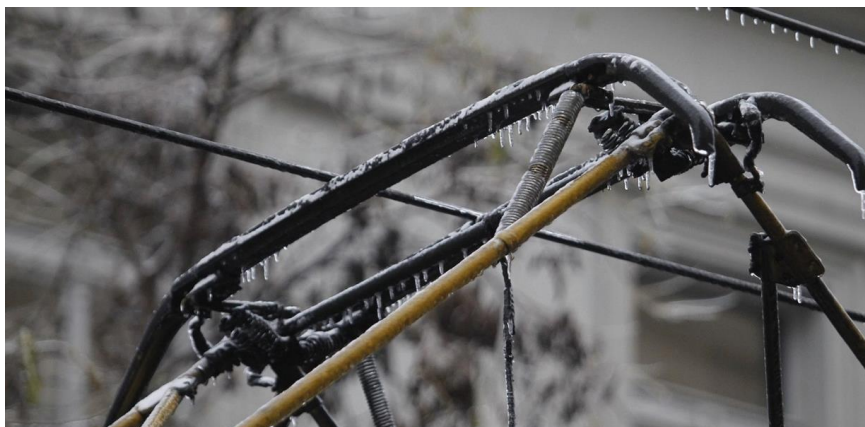
4.2.4	Zařízení pro studium kinematiky námrazy	56
4.2.5	Zařízení pro studium tribologických vlastností kapalin	57
4.2.6	Zařízení pro studium adheze námrazy	58
4.2.7	Zařízení pro měření kontaktního úhlu	59
4.3	Postup měření	60
4.3.1	Hodnocení vlivu kapalin na kinematiku námrazy	60
4.3.2	Hodnocení délky účinku vlivu směsí na kinematiku námrazy	62
4.3.3	Hodnocení vlivu směsí na tribologické vlastnosti kontaktu	62
4.3.4	Hodnocení vlivu kapalin na adhezi ledu k trolejovému drátu	65
4.3.5	Měření kontaktního úhlu rozhraní kapalina – trolejový drát	66
5	VÝSLEDKY	67
5.1	Konstrukce testovacího zařízení pro tvorbu námrazy	67
5.1.1	Koncepční řešení	67
5.1.2	Konstrukce	67
5.2	Vliv směsí na kinematiku námrazy	76
5.3	Výdrž ochrany vlivu směsí na vznik námrazy	79
5.4	Vliv směsí na tribologické vlastnosti kontaktu	81
5.5	Vliv směsí na adhezi ledu k trolejovému drátu	83
5.6	Velikost kontaktního úhlu směsí	86
6	DISKUZE	88
6.1	Vliv směsí na kinematiku námrazy	88
6.2	Vliv směsí na adhezi ledu	90
6.3	Vliv směsí na tribologické vlastnosti kontaktu	92
7	ZÁVĚR	94
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	95
9	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	100
10	SEZNAM TABULEK	103
11	SEZNAM PŘÍLOH	104

1 ÚVOD

Zajištění mobility osob v rámci městské aglomerace je jedním ze základních pilířů úspěšného rozvoje města. Dnes jsou k tomuto účelu, zejména v Evropě, využívány sofistikované systémy městské hromadné dopravy. Ty umožňují díky vysoké přepravní kapacitě obsloužit velké množství obyvatelstva i během dopravní špičky. Nedílnou součástí těchto systémů bývá tramvajová doprava. Její hlavní předností je vysoká přepravní kapacita v porovnání s autobusy a současně nižší investiční náročnost než v případě metra. Z dnešní perspektivy je však důležité, že se jedná o energeticky nízko náročný způsob přepravy s nulovými emisemi v místě výkonu. Tramvajová doprava je provozována v České republice v celkem sedmi městech a ve všech spoluvytváří páteřní dopravní síť. Díky tomu, může jakákoli dopravní komplikace ovlivnit životy velkého množství lidí, zejména komplikace vedoucí k zastavení celé dopravní sítě. Jedním z příčin mohou být extrémní klimatické podmínky, jako námraza a příbuzné jevy. Například ledová kalamita v roce 2014 znamenala úplné přerušování tramvajového provozu hned v několika městech a značné škody na infrastruktuře. I přesto doposud neexistuje uspokojivé řešení, které by podobným situacím předcházelo.

Námraza vzniká v zimním období, kdy se teploty pohybují pod nulou nebo mírně nad ní. Nejběžněji dochází k mrznutí kapek mlhy nebo desublimací vzdušné vlhkosti, a tím ke vzniku ledových krystalů na povrchu objektů. Současné systémy pasivní ochrany spoléhají především na fyzické odstranění námrazy i za pomoci manuální práce, což znamená zastavení provozu. Aktivní systémy pro ochranu trolejového vedení například využívají směsi proti tvorbě námrazy, které jsou nanášeny na trolejový drát a mají namrzání zabraňovat.

Tato diplomová práce je zpracovávána v rámci projektu Technologické agentury České republiky, jehož cílem je vyvinutí prediktivního systému ochrany trolejových vedení proti extrémním vlivům počasí. V rámci této práce budou zkoumány možnosti složení směsí proti tvorbě námrazy včetně návrhu testovacího zařízení a metodologie výzkumu.

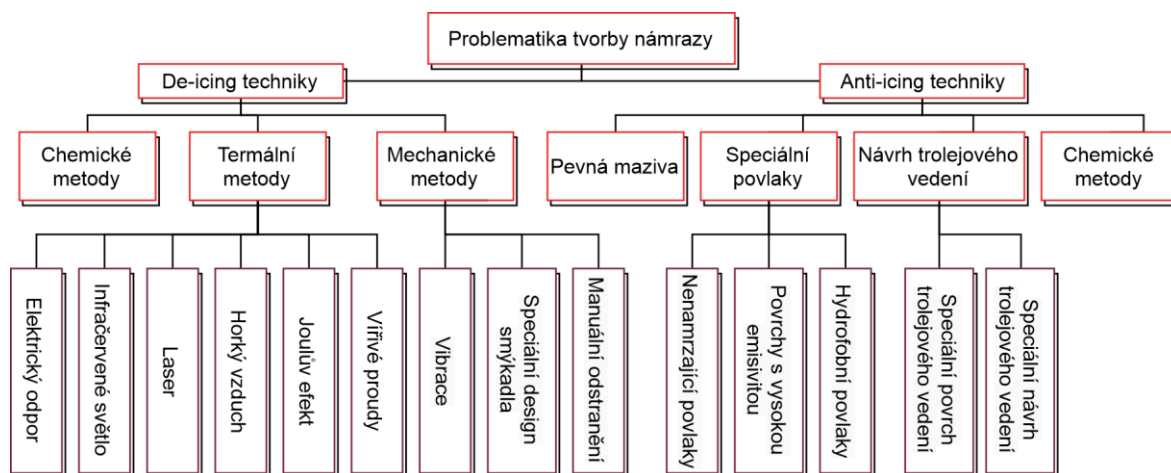


obr. 1-1 Pantografický sběrač proudu tramvaje zastavené z důvodu námrazy na troleji [1]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Technologie pro odstranění a ochraně trolejí před vznikem námrazy

Námraza trolejového vedení je nežádoucím nahodilým vnějším vlivem, který může vést až k zastavení provozu kolejové dopravy. Proto byly v průběhu času vytvořeny metody, jež by měly námraze předcházet (anglicky metody označované jako anti-icing), a také metody pro odstraňování již vzniklé námrazy (anglicky metody označované jako de-icing). V některých případech metody kombinují efekt odstranění námrazy a zároveň slouží i k následující ochraně před vznikem námrazy nové. Metody odstraňování námrazy a ochrana proti ní nacházejí uplatnění i v celé řadě dalších odvětví. Především v letecké dopravě, námořní dopravě, kosmickém průmyslu, nebo námraze přenosových elektrických sítí. Zejména v letecké dopravě má tato problematika zásadní a přímý vliv na bezpečnost provozu, a proto je jí věnována v tomto sektoru vysoká priorita. Nicméně podmínky i nároky na technologie ochrany a odstraňování námrazy jsou u trolejových vedení a letadel až na základní principy natolik rozdílné, že je bez zásadních úprav nelze aplikovat. Paralely lze pak hledat v porovnáních s problematikou námrazy přenosových elektrických sítí, u kterých se tento problém řeší již více než osmdesát let [2]. Možné metody odstranění a ochrany trolejového vedení před námrazou jsou zobrazeny na obr. 2-1. Část z těchto metod je však zatím pouze navržena v teoretické rovině a na své praktické uplatnění čeká. Dále tedy budou představeny pouze vybrané užívané metody.



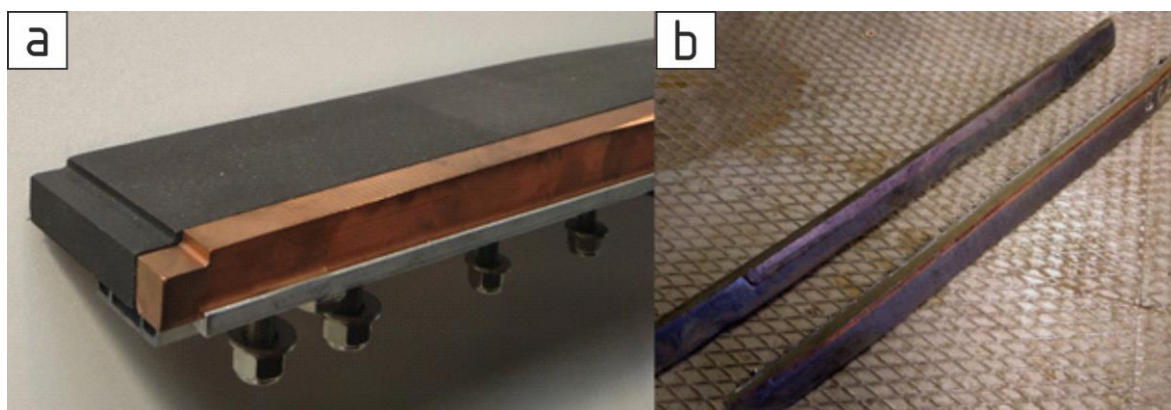
obr. 2-1 Možnosti odstranění a ochrany trolejového vedení před námrazou [3] (přeloženo)

2.1.1 Mechanické metody

Řadí se mezi nejstarší a dnes stále velmi rozšířený způsob odstraňování námrazy. Mezi tyto metody se patří ruční odstraňování námrazy. Jedná se o nejprimitivnější metodu odstraňování námrazy. Je značně časově náročná a vyžaduje velké množství pracovní síly. Námraza je odstraňována z trolejového drátu pracovníky z mobilních výsuvných plošin pomocí ručního nářadí, nebo ze země sklepáváním pomocí dlouhých tyčí. K bezpečnému odstranění námrazy je nutné odpojení trolejového vedení, což vede k zastavení provozu. Jedinou zjevnou výhodou této metody je absence nákladné investice do specializovaného vybavení.

Dalším způsobem mechanického odstranění námrazy je sběračem standartního kolejového vozidla. Takto je například v rámci běžného tramvajového provozu námraza z trolejového drátu eliminována. Díky krátkým intervalům mezi průjezdy nedochází k nárůstu námrazy do takové míry, kdy by již došlo k zastavení provozu. V případě, že je provoz přerušen nebo omezen, což se běžně děje například během noci, námraza může dosáhnout kritické míry. Z toho důvodu je někdy přistupováno k preventivnímu odstraňování námrazy sběračem v rámci servisních jízd. Tohoto způsobu bylo zejména v minulosti využíváno v Brně [4]. To především proto, že je zde úplná odstávka tramvajového provozu během noci.

Takové užívání smýkadla sběrače se však značně podepisuje na jeho životnosti. Z tohoto důvodu byla vyvinuta smýkadla, která snižují míru opotřebení. Jsou to kompozitní lišty smýkadel se zvýšenou odolností vůči mechanickému opotřebení. Především však skládané lišty smýkadel. Ty se konstrukčně liší v zesílené konstrukci náběžné hrany, která je v celé délce nebo její části nahrazena kovovým pásem nejčastěji z bronzu nebo mědi, viz obrázek obr. 2-2 a). Například *Dopravní podnik hlavního města Prahy* nechal nainstalovat tyto lišty na všechny své tramvaje vybavené pluhem pro zimní údržbu tratí [5]. Naopak *Dopravní podnik města Brna* vybavil těmito lištami některé tramvaje určené k běžnému provozu a ty jsou pak přednostně nasazovány na první ranní spoje. Lišty jsou zobrazeny na obr. 2-2 b) a označují se obchodními názvy *Icebreaker* a *IceScreeper* [4].



obr. 2-2 Skládaná kompozitní smýkadla, a) Lišta z produkce CZ Carbon, b) Demontované lišty *Icebreaker* (vlevo) a *IceScreeper* (vpravo) využívané DPMB v zimním období

2.1.2 Termální metody

Odstranění námrazy z vodiče pomocí tepla je energeticky velice nevhodné. Tuto skutečnost ukazuje práce Laforte a kol. [6], kteří srovnávali rozdílné odmrazovací metody pro elektrické rozvodné sítě. Na vodiči o průměru 37 mm a délce 1 m bylo provedeno odstranění námrazy tloušťky 3 mm různými metodami. Výsledky ukazují nutnou energii k odstranění daného množství námrazy kJ/kg, a poté přepočtenou na hodnoty plochy povrchu vodiče kJ/m². Výsledky shrnuje tab. 2-1, ze které je patrné, že energie nutná k odstranění námrazy mechanicky je řádově nižší. Zároveň je však mechanické odstranění námrazy časově více náročné a nelze ho automatizovat. Systémem odstraňování námrazy na trolejovém vedení pro vysokorychlostní tratě v Číně se zabýval Guo a kol. v článku [7]. Systém využívá Joulova tepla k odstranění již vzniklé námrazy a benefitem tohoto systému by měla být jeho autonomnost, kdy na základě matematického modelu je nahřívána trolej na požadovanou teplotu. Nicméně pro odstraňování námrazy tímto způsobem je nutná úprava technologického zázemí napájecí soustavy, což vyžaduje značné investiční náklady. V České republice se podobný systém testuje na železnici Desná v podhůří Jeseníků [8].

tab. 2-1 Porovnání energetické náročnosti odstranění námrazy z vodiče [6] (upraveno)

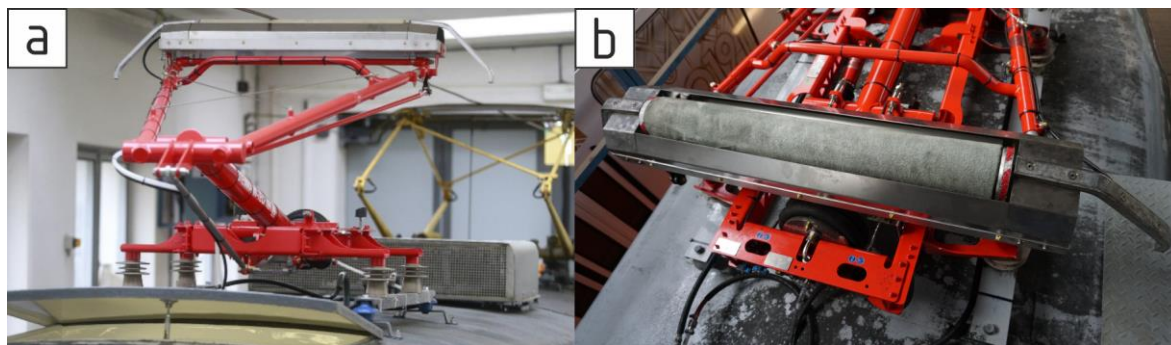
Metoda	Joulovo teplo		Infračervené světlo		Mechanické odstranění	
Potřebná energie	67 kJ/kg	180 kJ/m ²	63 kJ/kg	170 kJ/m ²	1,8 kJ/kg	4,4 kJ/m ²

Dalším způsobem odstranění námrazy z trolejového drátu pomocí tepla je externí ohřev. Takové zařízení je popsáno v patentu [9] a je určeno pro trolejbusové sběrače proudu. Zařízení využívá topné patrony umístěné pod smýkadlo tyčového sběrače o výkonu 600 W, ty vyhřívají smýkadlo na teplotu až 280 °C.

2.1.3 Chemické metody

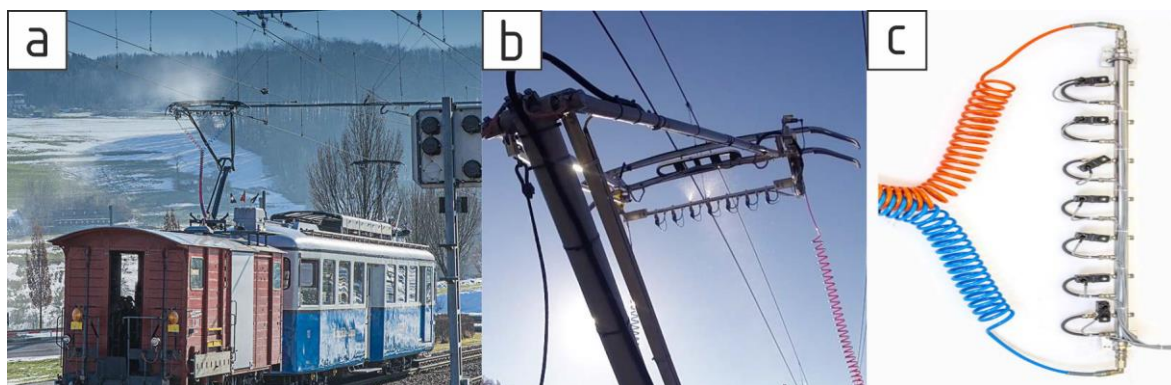
Další ze způsobů odstranění námrazy a jejímu předcházení je aplikace směsí proti námraze. Jsou to často viskózní kapaliny s množstvím pevných přísad, které snadno ulpí na povrchu trolejového drátu. Jejich detailnímu popisu bude věnována samostatná kapitola. Aplikace je prováděna nejčastěji skrze k tomu speciálně upravený sběrače, který je umístěn na vozidle údržby. Aplikace je prováděna bezkontaktně nebo kontaktním roztíráním kapaliny na povrch drátu. Při kontaktním nanášení k tomu může sloužit systém nanášecích kartáčků, do kterých je vytlačována protinámrazová kapalina, to je popsáno v patentu [10]. Další možností je rotující válec umístěný místo smýkadla na upraveném sběrači kolejového vozidla. Tento válec je obvykle vyroben z velice poddajného porézního materiálu a jeho povrchem se aplikuje protinámrazová směs na trolej. Na samotný povrch válce lze aplikovat protinámrazovou směs pomocí brodění, tak jak je popsáno v patentu [11] nebo pomocí trysek. To je zmiňováno v patentu [12], přičemž tento způsob využívá i komerčně dostupný systém NIS (Non-icing-system) od *Stemmann-Technik* [13].

Toto zařízení je zobrazené na obr. 2-3. Jedním z uživatelů zařízení je *Dopravní podnik hlavního města Prahy* a to od roku 2016 [5]. Nyní již má k užívání dva tyto systémy. Dalším uživatelem je *Dopravní podnik města Brna*, kde bylo toto zařízení pro potřeby této práce zkoumáno. Zařízení NIS je zde namontováno na servisní tramvaji. Ta je k aplikování protinámrazové směsi využívána v nočních hodinách. Pravidelný provoz této tramvaje je v zimních měsících, kdy je očekáván vznik námrazy na základě meteorologické předpovědi.



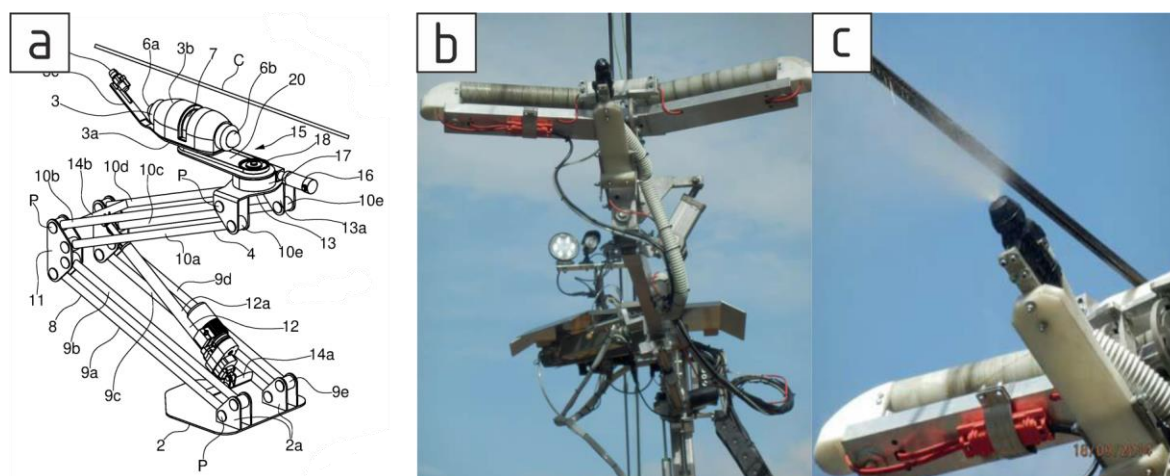
obr. 2-3 Systém proti námraze NIS od Stemmann-Technik a) Celkový pohled na sběrač namontovaný na střeše tramvaje [14], b) Detailní pohled na aplikační válec na servisní tramvaji využívané dopravním podnikem města Brna

Bezkontaktně se na trolej nanáší nemrznoucí směs pomocí trysek. Systém popsany v patentu [15] využívá příčné vedení umístěné na sběrači, které pomocí vodících prvků kontaktně sleduje klikatost troleje. V tomto vedení jsou umístěny tři trysky směřující na spodní plochu a boky trolejového drátu. Do trysek je přiváděna nemrznoucí směs hadicemi z tlakového zařízení uvnitř vozidla. Odlišný systém je popsán v patentu německé firmy *Kummler + Matter* [16]. Na upravené smýkadlo běžného sběrače je umístěna lišta s dvoumédiovými tryskami napájenými tlakovým vzduchem a protinámrazovou kapalinou z prostoru servisního vozu. Trysky jsou v tomto případě umístěny pod smýkadlem a aplikace probíhá pouze na základě ultrazvukové detekce polohy drátu. Zařízení aplikování provádí pouze pokud je tryška umístěna pod aktuální polohou trolejového drátu. Od stejné firmy jeta také komerčně dostupné řešení pod názvem *Profil 1500V* [17]. Systém je využíván na švýcarské železniční trati *Gornergratbahn* a jeho nasazení je možné vidět na obr. 2-4.



obr. 2-4 Sběrač vybavený soustavou trysek pro nanášení směsi proti námraze a) Reálné nasazení na servisním voze, b) Pohled sběrač při nanášení směsi, c) Lišta s tryskami pro montáž do sběrače [17]

Odlíšným systémem je zařízení popsané v patentu firmy *Dipsa Technes* [18]. Zařízení využívá jedinou trysku umístěnou na robotickém rameni, viz obr. 2-5 a). To svým pohybem automaticky kopíruje klikatost a výškovou změnu polohy trolejového drátu. Poloha je detekována systémem kamer na rozpoznání obrazu. Zařízení vycházející z tohoto patentu firma vyrábí a nabízí pod obchodním názvem *FroSTOP* [19]. Zařízení je zobrazené na obr. 2-5 b), c). Zvláštností tohoto zařízení je, že aplikuje speciální mazivo *Interflon Lube EPR*, které neobsahuje alkoholy a je v něm příměs mikroskopických částic teflonu. Pro prodloužení výdrže ochrany trolejového drátu před námrazou je mazivo před aplikací nabito elektrostatickým nábojem opačné polarity, než je potenciál v troleji. Díky tomu pevné částice v mazivu ulpí na povrchu drátu a vytvoří rovnoměrnou vrstvu. Úspěšná aplikace je podmíněná odpojením napájení trolejového vedení.

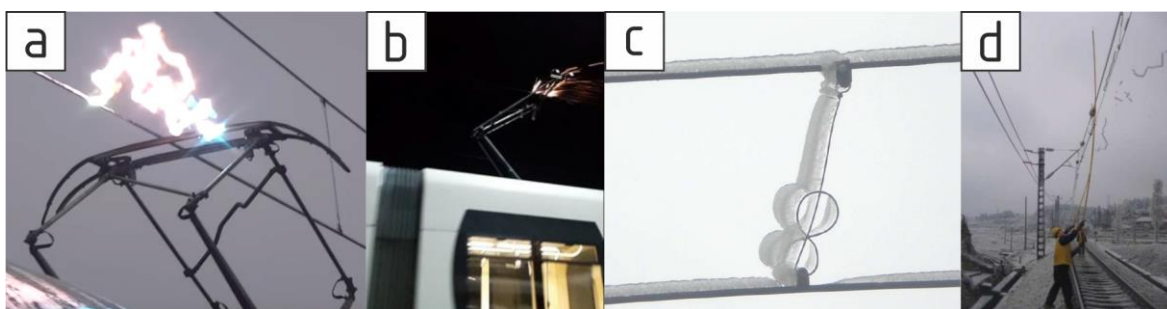


obr. 2-5 a) Patent firmy od společnosti *Dipsa Technes* [18], b) robotické rameno se soustavou senzorů pro sledování polohy trolejového drátu), c) detailní pohled na aplikační trysku [19]

2.2 Rizika a následky námrazy trolejových vedení

Při namrzání trolejového drátu, ale i celého vedení, dochází k výraznému nárůstu nesené zátěže. Tato zátěž může dosahovat i jednotek kilogramů na metr. Takto dochází k nadměrnému opotřebenosti upínacích a přídržných součástí trolejového vedení. V kombinaci s vnějšími vlivy jako vítr, to může být pro některou nosnou součást fatální. Takto může dojít k úplnému poškození části trolejového vedení. Dále má přidaná hmotnost na trolejovém vedení vliv na velikost průvěsu drátu. To má negativní vliv na spolupráci sběrače s trolejí a dochází tak k většímu opotřebenosti kontaktních ploch a snížení životnosti. Přidáním hmotnosti na trolejové vedení se změní dynamické vlastnosti celého systému. Vlivem působení sil od sběrače nebo větru může dojít k tak velkému vychýlení, že se trolejové vedení dostane mimo svojí pracovní pozici což zmiňuje v článku [20] Muller a kol. To může vést ke stržení sběrače z kolejového vozidla.

Vrstva námrazy často dosahuje vysoké adheze k povrchu trolejového drátu. Samotné poježdění sběračem ji nemusí odstranit. Dochází tím ke smýkání sběrače až po vrstvě námrazy, čímž vzniká v elektrickém kontaktu mezilehlá špatně vodivá vrstva. Ta je příčinou ohřívání kontaktní dvojice. Navíc může docházet k vytvoření elektrického oblouku, viz obr. 2-6 a). Problematice vzniku elektrického oblouku v kolejové dopravě a jeho potlačení za pomoci protinámrazové kapaliny se věnoval Er a kol. [3]. Elektrický oblouk pak může způsobit poškození trolejového drátu nebo sběrače nejen vysokou teplotou, ale i kvůli elektroerozi [21]. Vrstva námrazy v krajním případě může dosáhnout i tak vysoké hodnoty elektrického odporu, že tím způsobený úbytek napětí znemožní vozidlu schopnost další jízdy.

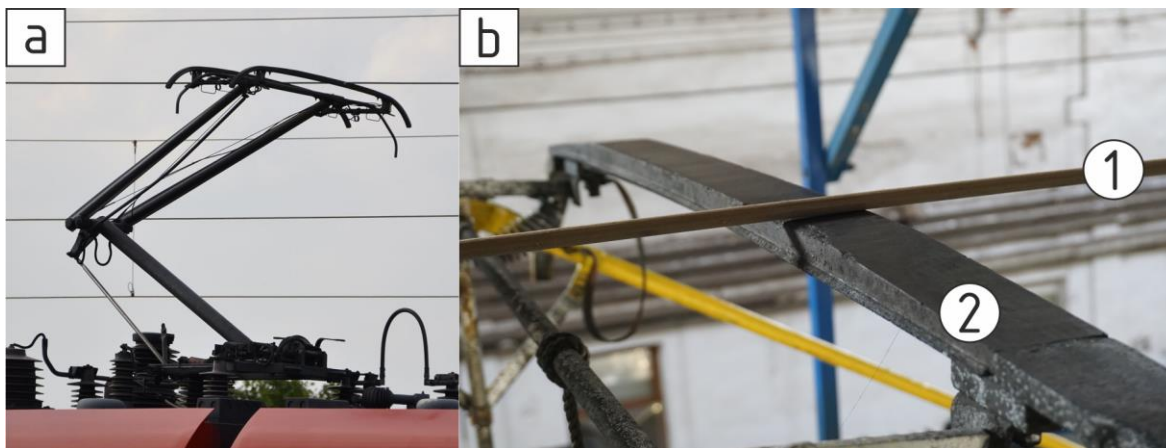


obr. 2-6 a), b) Elektrický oblouk vytvořený důsledkem námrazy na trolejovém drátu [3], c), d) manuální odstraňování námrazy pomocí tyčí [21]

2.3 Problematika styku sběrače a troleje

2.3.1 Sběrač

Každé kolejové vozidlo elektrické trakce závislé musí být vybaveno zařízením, jež zajišťuje přívod elektrické energie z trakčního vedení. Toto zařízení se nazývá sběrač. Rozeznáváme několik základních typů sběračů: tyčový, třmenový a pantografického typu [22]. S tyčovým a třmenovým sběračem se dnes již v kolejové dopravě téměř nesetkáme, nicméně tyčový sběrač stále nachází uplatnění v trolejbusové dopravě. V kolejové dopravě byly oba výše uvedené typy nahrazeny sběrači pantografickými. Ty lze dále rozdělit na dvouramenné nebo jednoramenné, viz. obr. 2-7 a). Pantografické sběrače využívají stejnojmenného zařízení, zajišťující přímočarý zdvih smýkadla. Díky tomu lze sběrač provozovat při jízdě v obou směrech. Smýkadlo, zobrazené na obr. 2-7 b), je umístěno na vrcholu sběrače a skrze jednu nebo více lišt zajišťuje styk s trolejovým drátem. Materiálem kontaktních lišt je nejčastěji směs čistého uhlíku v amorfní a grafitické podobě. V případě kompozitních lišt se jedná čistý uhlík plněný kovovými částicemi [23]. Ty bývají nejčastěji měděné a jejich podíl na celkové hmotnosti lišty se určuje tzv. stupněm plnění. To uvádí ve svém katalogu výrobce sběračů Mersen [24]. Výrobci také nabízejí lišty s kovovými náběžnými hranami, viz obr. 2-2), které mají snížit opotřebení lišt při námraze trolejového drátu.



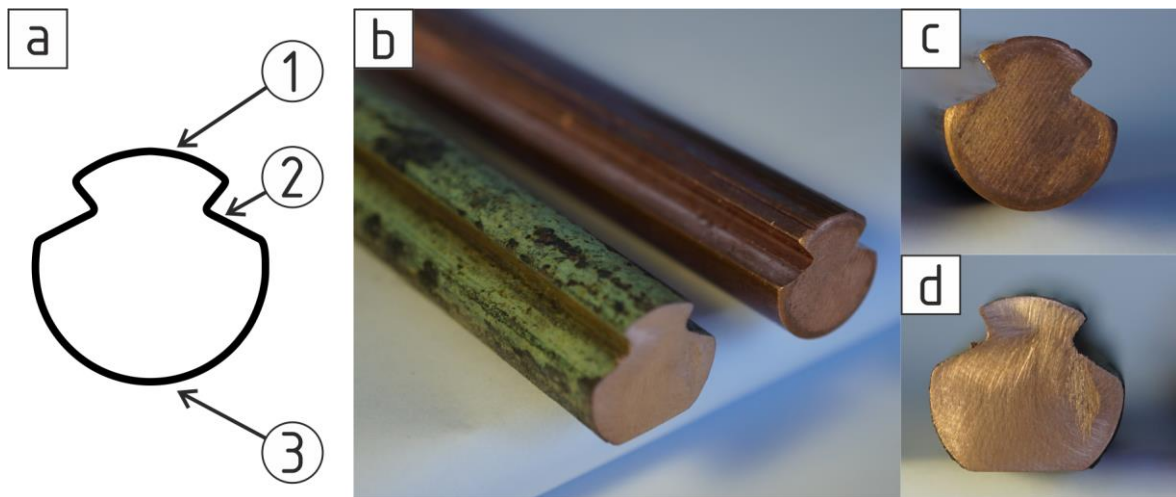
obr. 2-7 a) Sběrač pantografového typu - jednoramenný [25], b) detail kontaktu obložení sběrače s trolejovým drátem (1 – trolejový drát, 2 – lišta smýkadla)

Velikost přitlačné síly sběrače by měla být stejná v celé pracovní výšce zdvihu tak, aby nedocházelo k odskoku od troleje. Ke změnám výšky troleje může docházet vlivem průvěsu troleje nebo změnou průřezného průřezu trati, například v tunelu. Velikost přitlačné síly je dána především statickou přitlačnou silou, tedy přitlačnou silou působící na trolej, pokud je vozidlo nehybné. Ta je například pro brněnský dopravní podnik dána směrnici T24r2 [26] a stanovuje velikost přitlačné síly na 60 až 80 N s odchylkou ± 10 N. Pro železniční dopravu v České republice je tato síla stanovena na základě nároků normy ČSN EN 50206-1 [27] na 70 N pro střídavou trakční soustavu, respektive 90 N pro stejnosměrnou. Maximální velikost dynamické síly pak nesmí přesáhnout 250 N.

2.3.2 Trakční vedení

Základní částí trakčního vedení tvoří trolejový drát plného průřezu charakteristického tvaru s podélnými drážkami (2) pro uchycení zobrazený v řezu na obr. 2-8 a). Na spodní straně bez drážek (3) dochází ke kontaktu se sběračem. Na vrchní straně (1) lze podle počtu malých drážek v profilu identifikovat materiál troleje. Samotný trolejový drát je napínán silou až 15 kN [28]. Nároky na parametry trolejového drátu jsou dány evropskou normou ČSN EN 50 149 [29]. Je v ní definováno pět základních velikostí průřezů trolejového drátu: 80 mm^2 , 100 mm^2 , 107 mm^2 , 120 mm^2 a 150 mm^2 . V normě jsou dále uvedeny materiálové a mechanické požadavky na trolejový drát. Ten je vyroben buď z čisté elektrotechnické mědi, nebo z její slitiny se stříbrem, kadmíem, hořčíkem nebo cínem. Obecně lze říci, že slitiny mědi s výše uvedenými kovy vykazují lepší mechanické vlastnosti oproti čisté elektrotechnické mědi, zároveň však mají nižší vodivost uvádí v práci [23] Wu.

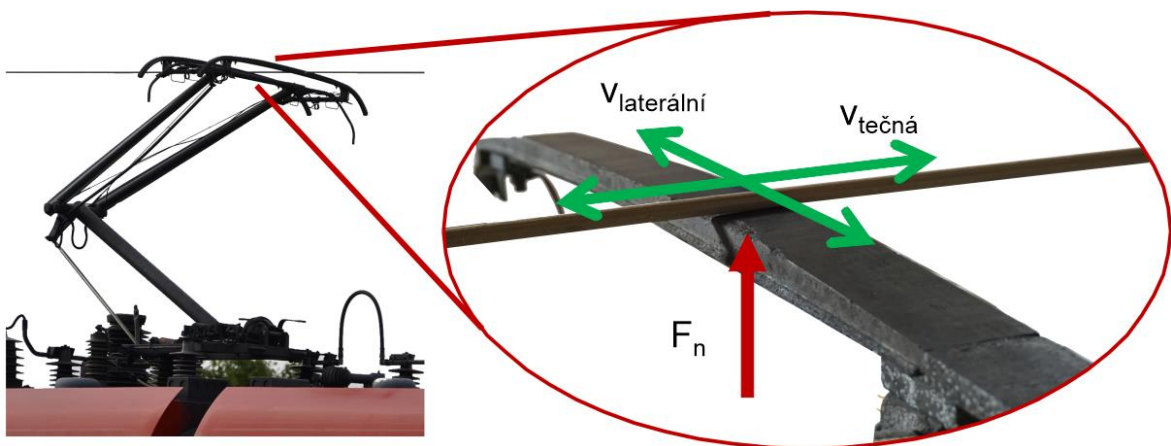
Trolejový drát podléhá opotřebení. To se projevuje vznikem rovinné plochy na spodní části trolejového drátu, viz obr. 2-8 d). Maximální velikost tohoto opotřebení stanovují správci infrastruktury a například česká *Správa železnic* jej uvádí v předpise E10 [30]. Ten stanovuje maximální velikost opotřebení v rozmezí 20 až 40 % podle průřezu trolejového drátu a maximální pojížděné rychlosti.



obr. 2-8 a) průřez trolejového drátu, b), porovnání nového (průřez 120 mm²) a opotřebeného (průřez 150 mm²) trolejového drátu a jejich zobrazení v řezu

2.3.3 Kontakt sběrač trolej

Jedná se styk výše popsané dvojice. Geometricky se jedná o nekonformní styk válce s rovinnou. Kontakt není zpravidla mazán žádným kapalným mazivem, a tak dochází k suchému tření. Pohybující se člen je v tomto případě smýkadlo. Nicméně jeho pohyb není jen v axiálním směru trolejového drátu, nýbrž i v laterálním, tak jak je to zobrazeno na obr. 2-9 a). To znamená, že poloha kontaktní plochy se jak na trolejovém drátu, tak i na smýkadle neustále pohybuje. To je způsobeno cílenou klikatostí trolejového drátu. Díky tomu dochází k rovnoměrnému opotřebení celé šíře lišt smýkadla a také se zabrání poškození lišty nadměrným lokálním ohřevem.



obr. 2-9 a) zobrazení rychlostí (v) a normálové síly (F_n) působící v kontaktu sběrač-trolej

Vliv tepla na kontakt je velmi významný. Kromě vzniku tepla mechanickým třením, dochází k ohřívání především skrze Joulovo teplo. To vzniká díky přechodovému odporu v kontaktu, a také v uhlíkové liště, která není zcela ideální elektrický vodič [23]. Kromě toho může docházet mezi sběračem a trolejí ke vzniku elektrického oblouku.

Dle knihy [23] Wu popisuje, že chování a životnost kontaktní dvojice sběrače troleje nejvíce ovlivňuje:

- normálová přitlačná síla sběrače,
- materiál lišty smýkadla a trolejového drátu,
- velikost kontaktní oblasti,
- elektrický proud procházející kontaktem,
- rychlost vlaku,
- vnější vlivy (teplota vzduchu, vlhkost, srážky, námraza).

Vztah normálové síly a její vliv na třecí síly je popisován pomocí Bowden-Taborovy adhezní teorie tření. Ta říká, že kontakt mezi reálnými povrchy je realizován na zlomku nominální plochy, což vykládá mikroskopickou drsností povrchu. Tlak na takto malé ploše vede na překročení meze kluzu a dojde k plastickému toku materiálu. Tok bude pokračovat, a tím se zvětšovat reálná kontaktní plocha, dokud nenastane rovnováha sil.

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{A_r \cdot \tau}{A_r \cdot p} = \frac{\tau}{p} \quad (2-1)$$

μ	součinitel tření	[-]
F	třecí síla	[N]
W	normálová síla	[N]
A_r	skutečná styková plocha	[m ²]
τ	smykové napětí v adhezních spojích	[Pa]
p	průměrný stykový tlak	[Pa]

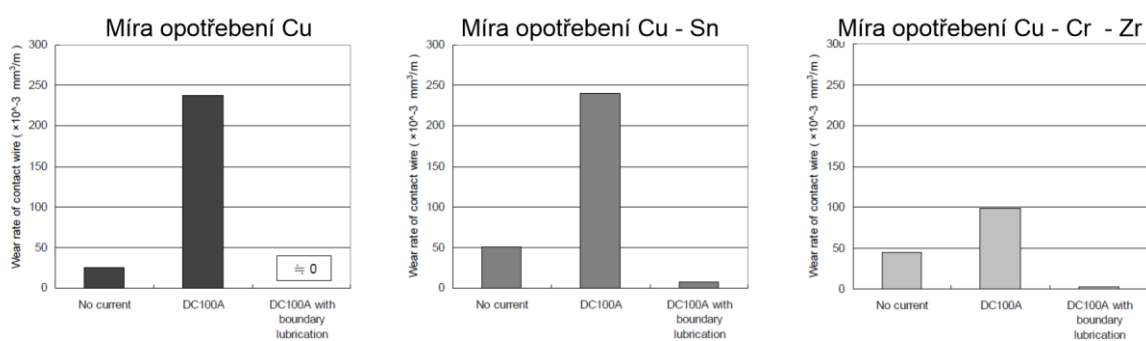
První zmíněná práce [31] autorů He a kol. se věnuje především vlivu volby materiálu smýkadla na chování kontaktu sběrač-trolej. Pro potřeby této studie autoři použili skutečný vzorek trolejového drátu z čisté mědi délky 250 mm. Ten je upnut v testovacím zařízení, které se vzorky vykonává přímočarý reciproční pohyb rychlostí 0,25 m/s. Na něj je přitlačován třecí element představující sběrač normálovou silou 13,3 N. Test byl dlouhodobý s počtem cyklů 10⁶. Zkoumána byla interakce s uhlíkovým kompozitním smýkadlem. Dále pak měděného smýkadla při suchém tření a také za použití dvou odlišných maziv CALTEX TL750 a maziva na bázi grafitu. Při suchém tření kontaktu s měděným smýkadlem se ukázalo, že dominantním mechanismem je adhesivní opotřebení. Naopak u suchého kontaktu uhlíkového smýkadla bylo pozorováno abrazivní opotřebení na trolejovém drátu. Ukazuje se, že tvrdá uhlíková zrna vytváří rýhy v měkké mědi trolejového drátu. Identické opotřebení je pozorováno také u kontaktů opatřených mazivem. Tento rozdíl v mechanismu opotřebení se také promítl do součinitele tření, kdy suchý kontakt měděného smýkadla vykazoval hodnoty přesahující 0,35. Oproti tomu ostatní vzorky dosahovaly součinitele tření mezi 0,21 až 0,23.

V navazující práci [32] se He a kol. zabývali stejnými materiálovými dvojicemi při stejné metodice, nicméně tentokrát při zohlednění vlivu působení elektrického proudu. Závěr ukazuje, že vývoj součinitele tření je velice podobný jako u kontaktu, kterým neprochází elektrický proud. Další veličinou, která byla hodnocena v rámci tribologických testů, je vývoj přechodového odporu v kontaktu. Ten dosahuje nejnižší hodnoty u suchého kontaktu a měděného smýkadla, konkrétně $0,076 \mu\Omega$. Zřejmě v důsledku zvýšení počtu částic opotřebení v kontaktu a oxidaci povrchů dochází k jeho růstu přibližně o 5 %. Jak již bylo zmíněno, mazivo u této materiálové dvojice vede ke snížení součinitele tření, nicméně přechodový odpor v kontaktu se v důsledku mazání zvyšuje. Uhlíková kompozitní lišta vykazuje hodnotu přechodového odporu $5,3 \mu\Omega$.

Studiem mazání rozhraní sběrač-trolej ve vztahu k opotřebení se ve své práci [33] také zabývali Okimoto a kol. Jako simulátor sběrače a troleje bylo využito kolo s trolejovým drátem připevněným po obvodu o průměr 2 m a přitlačováno na zkušební sběrač. Pro experimenty bylo užito třech různých materiálů trolejového drátu viz tab. 2-2. Použitá normálová síla byla 47 N, obvodová rychlost kola 7 km/h a také docházelo k laterálnímu posouvání smýkadla. Test byl o délce 370 min. Testování probíhalo za třech různých podmínek. Bez elektrického proudu v kontaktu, stejnosměrný proud 100 A procházející kontaktem a se stejným proudem při použití maziva ve spreji. Výsledky, zobrazené na obr. 2-10 ukazují, že použití maziva významně snižuje opotřebení. Zároveň je z výsledků patrné, že v případě nepoužití maziva, je míra opotřebení, značně ovlivňována tvrdostí trolejového drátu.

tab. 2-2 Materiály trolejového drátu užitě v [33], * International Annealed Copper Standard

Materiál	Cu	Cu-Sn	Cu-Cr-Zr
Tvrdość HB [MPa]	120	130	180
Vodivost dle IACS* [%]	98	70	80

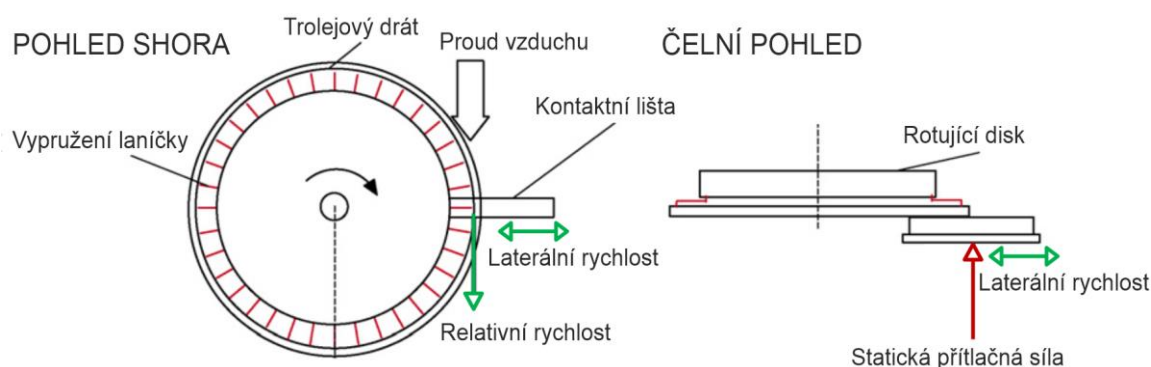


obr. 2-10 Míra opotřebení trolejového drátu [$10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$] dle materiálu trolejového drátu a podmínek kontaktu – bez proudu, stejnosměrný proud 100 A, stejnosměrný proud 100 A a mazivo [33]

Další práci věnující se opotřebení kontaktní dvojice sběrač-trolej a jeho předvídání se věnoval Bucca a Collina [34]. Součástí práce je také v úvodu rozsáhlá rešerše výzkumů zaměřených na zmiňovanou kontaktní dvojici a k tomu užívané testovací zařízení.

Autoři uvádí, že testovací zařízení jsou nejčastěji v podobě rotujícího disku, představujícího trolej a k němu přitlačovaný kluzný element představující smýkadlo sběrače. To často vykonává ještě laterální pohyb pro simulování klikatosti skutečného trolejového drátu. Rychlosti smýkání dosahují i 100 m/s, a to u testovacích zařízení určených pro výzkum v oblasti vysokorychlostní železnice. Zároveň je sledován vliv elektrického proudu, ten je nejčastěji stejnosměrný a dosahuje velikosti až 1200 A. Autoři sledují, že opotřebenění lišty smýkadla a trolejového drátu je funkcí hlavních parametrů: skluzové rychlosti, velikost elektrického proudu a materiálové dvojici. Teplotu v kontaktu pak popisují, jako závislou na těchto zmíněných parametrech.

Pro experimenty použité testovací zařízení bylo v podobě rotujícího disku simulujícího trolej a na něj byl ve směru osy rotace přitlačován kluzný element. Ten navíc vykonával příčný pohyb k obvodové rychlosti disku, viz obr. 2-11. Experimenty bylo prováděny při obvodové rychlosti disku 160 km/h, za působení normálové síly 80 až 90 N. Testy proběhly nejdříve bez účinků elektrického proudu a následně se stejnosměrným proudem 500 A, 750 A, 1000 A. Místo kontaktu bylo opatřeno intenzivním vzduchovou ventilací závislou na rychlosti rotace disku, tak aby simulovala jízdu vlaku.



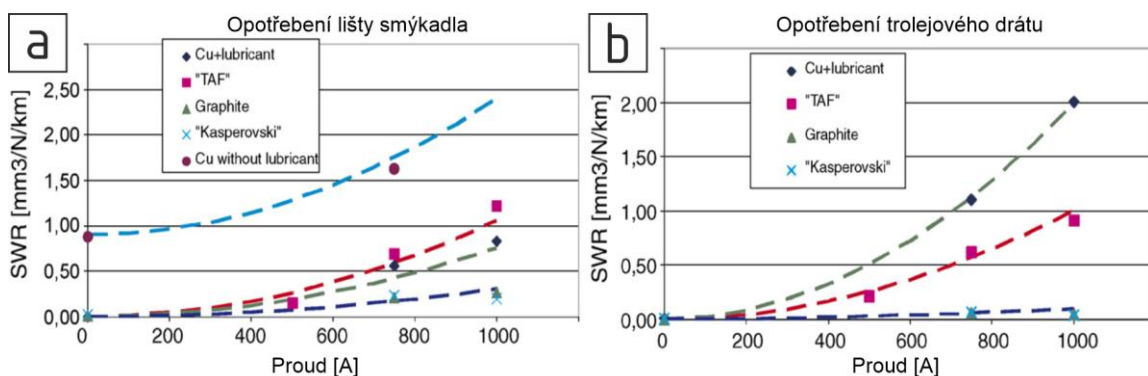
obr. 2-11 Schéma testovacího pro kontakt sběrač-trolej užívané na univerzitě v Miláně [34]

Pro testy bylo použity rozdílná smýkadla. Monolitická Cu lišta bez maziva a opatřená mazivem, “TAF” skládaná kompozitní lišta z širokých měděných pásů na hranách a pásu grafitu uprostřed, standartní monolitická uhlíková lišta a “Kasperowski” lišta s tenkými měděnými pásy na náběžných hranách. Během testů byla vyhodnocována především specifická míra opotřebenění, viz (2-2). Dále byl během testů zaznamenáván součinitel tření.

$$SWR = \frac{V}{sF_s} \quad (2-2)$$

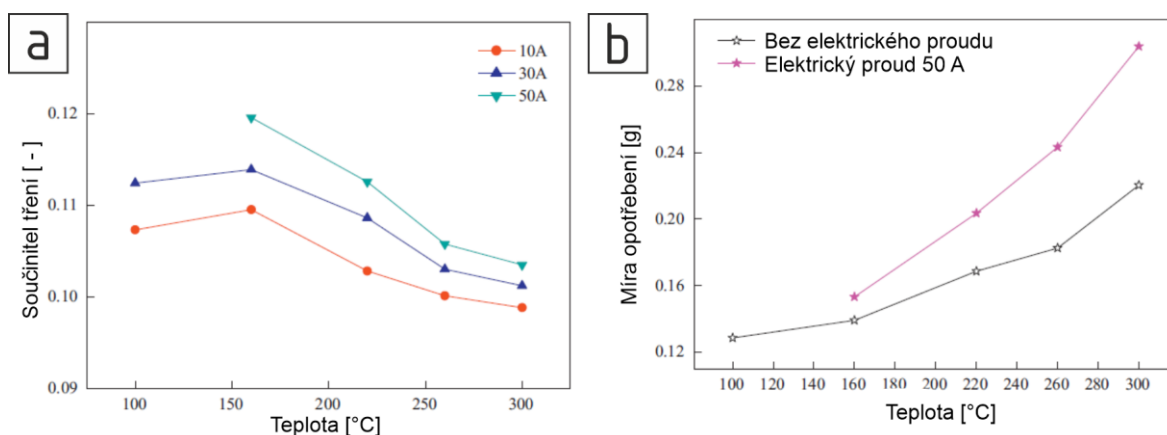
SWR	specifická míra opotřebenění	[mm ³ ·km ⁻¹ ·N ⁻¹]
V	objem opotřebeného materiálu	[mm ³]
s	skluzová vzdálenost	[km]
F _s	střední hodnota normálové síly v kontaktu	[N]

Výsledky jsou shrnuty na obr. 2-12. Je z nich patrné, že míra opotřebení jak u smýkadla, tak trolejového drátu závisí na proudu procházející kontaktem. Nejlepších hodnot dosahuje monolitická uhlíková lišta následovaná lištou typu “Kasperovski”. Naopak nejhorších výsledků dosahuje monolitická měděná lišta. Během testů byl také měřen součinitel tření. Střední hodnota u nemazané měděné lišty vysoké hodnoty 0,76. Naopak s použitím maziva tato hodnota klesla na 0,21. Uhlíková lišta vykazovala hodnotu 0,36.



obr. 2-12 Výsledky míry opotřebení a) lišty smýkadla, b) trolejového drátu se zobrazením trendu pro různé typy smýkadel a výše proudu procházející kontaktem [34]

Vlivem tepla a působením elektrického oblouku na kontakt se zabývali Ding a kol. [35]. Využívali k tomu zařízení v konfiguraci pin-on-disk, kde disk o průměru 290 mm měl stykovou plochu tvořenou čistou elektrotechnickou mědí a pin o průměru 10 mm byl tvořen uhlíkem. Testování probíhalo při různém proudovém zatížení kontaktu až do hodnoty 50 A, přičemž smyková rychlost byla nastavena na 70 km/h. Normálová síla v kontaktu byla 55 N a smyková vzdálenost 180 km. Mezi experimenty byl uhlík měněn a měděný disk broušen brusným papírem o zrnitosti 1200 a čištěn acetonem. Před samotným měřením byl kontakt necháván zaběhnout, aby byl měřen ustálený stav chování kontaktu.



obr. 2-13 a) Závislost součinitele tření na teplotu kontaktu a velikosti elektrického proudu, b) míra opotřebení uhlíkového pinu po 180 km smykové vzdálenosti při různé teplotě kontaktu [35]

Při měření se kontakt bez proudového zatížení ustálil na teplotě kolem 38 °C. Naopak pokud kontaktem procházel proud 50 A teplota se ustálila na 110 °C. Tento teplotní rozdíl autoři přičítají právě Joulovu teplo a výboje elektrického oblouku v kontaktu. Další testy probíhaly při cíleném ohřevu kontaktu pomocí topných patron. Dle měření viz obr. 2-13 a) se ukázalo, že vyšší teplota vede ke snížení součinitele tření. Naproti tomu vyšší proudové zatížení v kontaktu tření zvyšuje. Nicméně všechny naměřené hodnoty se pohybují v intervalu 0,1 až 0,12. Autoři vysvětlují pokles součinitele tření s vyšší teplotou oxidováním povrchu stykových těles. Takovýto povrch je následně mnohem více náchylný na vylamování jeho částí. Takto vzniklé nečistoty v kontaktu tvoří vrstvu fungující jako mazivo. Tuto teorii potvrzuje i měření míry opotřebení uhlíkového pinu viz obr. 2-13 b). Se vzrůstající teplotou roste opotřebení, a to jak u kontaktu s procházejícím elektrickým proudem, tak i bez něj.

Ve své práci [36] se autoři Zhang a kol. zabývali především vlivem dynamických sil na chování kontaktu. Měření probíhalo na zařízení typu pin-on-disk s pinem tvořeným čistým uhlíkem a měděný disk legovaný chromem při rychlostech do 100 km/h. Na základě terénních měření byl sestaven signál normálové síly v kontaktu. Výsledky ukázaly, že součinitel tření s rostoucí rychlostí klesá z 0,33 na 0,29 při rychlosti 80 km/h. Poté však dochází k jeho prudkému nárůstu až na 0,34 při 100 km/h. Míra opotřebení tento trend kopíruje. Autoři si toto chování vysvětlují pozorování množství výbojů v kontaktu v podobě elektrického oblouku. Do rychlosti 80 km/h k nim téměř nedochází, načež se do rychlosti 100 km/h jejich četnost téměř zdesetinásobí.

Senouci a kol. se v práci [37] zabývali popisem mechanismu opotřebení. Pro experimenty použili zařízení typu pin-on-disk s kontrolovanou atmosférou. Použitý pin byl z čisté elektrotechnické mědi o průměru 5 mm a disk byl z polykrystalického uhlíku průměru 5 cm. Zátěžná normálová síla v kontaktu byla 20 N a rychlost tření 2 m/s. Při standardních laboratorních podmínkách dosahoval součinitel tření hodnoty 0,17. Přidáním účinku stejnosměrného elektrického proudu do kontaktu o hodnotě 10 A vedlo ke snížení součinitele tření na 0,12. Díky snímkování pomocí elektronového mikroskopu bylo pozorováno, že okolní atmosféra vytváří na povrchu kontaktních těles vrstvu oxidů mědi s fragmenty uhlíku. V případě, že se pro testy použije vakuum nebo argonová ochranná atmosféra, oxidická vrstva nevzniká a dochází k abrasivnímu opotřebení. Dále je popsáno, že ačkoli je monokrystalický uhlík značně anizotropní, jeho polykrystalický stav užívaný pro výrobu smýkadel nikoli. Je to vysvětlováno nahodilou orientací zrn v makrostruktuře. Přesto v samotném kontaktu vrstvu částic uhlíku tvoří především monokrystaly, které v návaznosti na třecí podmínky mají stejnou orientaci. Dále bylo sledováno opotřebení, které v případě uhlíku vede k oxidaci na CO a CO₂. Toto erozivní opotřebení se zvětšuje s rostoucí teplotou v návaznosti Joulovo teplo a hustotou elektrického proudu v kontaktu. Růst vrstvy oxidů mědi způsobuje vznik nevodivé vrstvy, kdy při dosáhnutí její kritické tloušťky dojde k jejímu probití. Opotřebení v kontaktu je tedy abrasivní a erozivní.

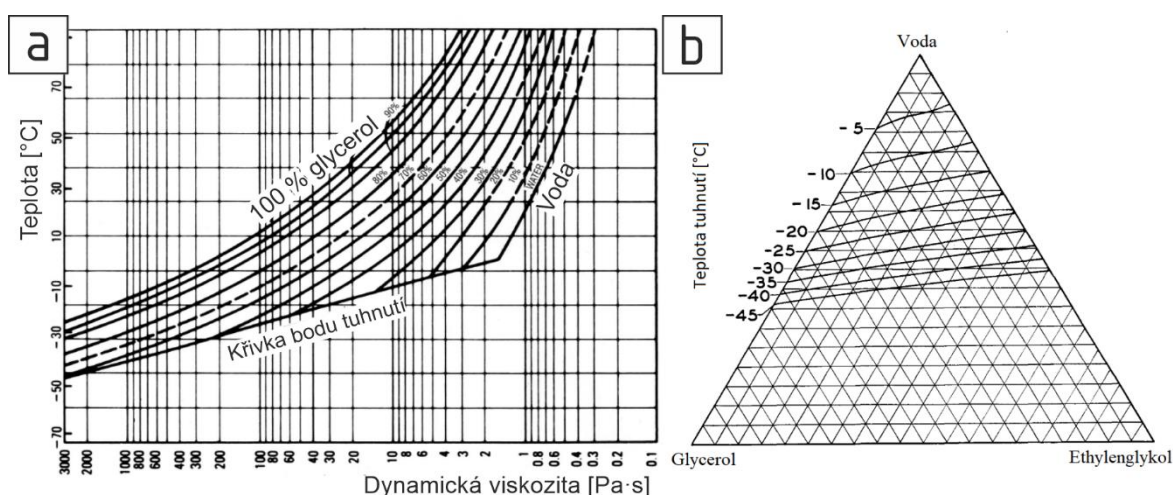
2.4 Směsi proti tvorbě námrazy

Jedná se o kapalné roztoky, případně suspenze. Základní látkou těchto směsí je obvykle roztok vody s jedním z derivátů uhlovodíku: etylenglykolem, propylenglykolem nebo glycerolem. Všechny tyto kapaliny lze díky hydroxylové skupině (–OH) zařadit mezi alkoholy. Etylenglykol a propylenglykol se pak se dvěma hydroxylovými skupinami řadí mezi glykoly neboli též dioly, glycerol pak patří mezi trioly. Glycerol a propylenglykol jsou zdravotně nezávadné, naopak etylenglykol je značně jedovatý a nebezpečný pro životní prostředí. Nicméně ze všech těchto zmíněných dosahuje nejnižší viskozity, jak je vidět v tab. 2-3, a proto se nejvíce využívá jako chladicí kapalina. Všechny tyto alkoholy jsou snadno biologicky rozložitelné, ačkoli k tomu potřebují velké množství vzdušného kyslíku.

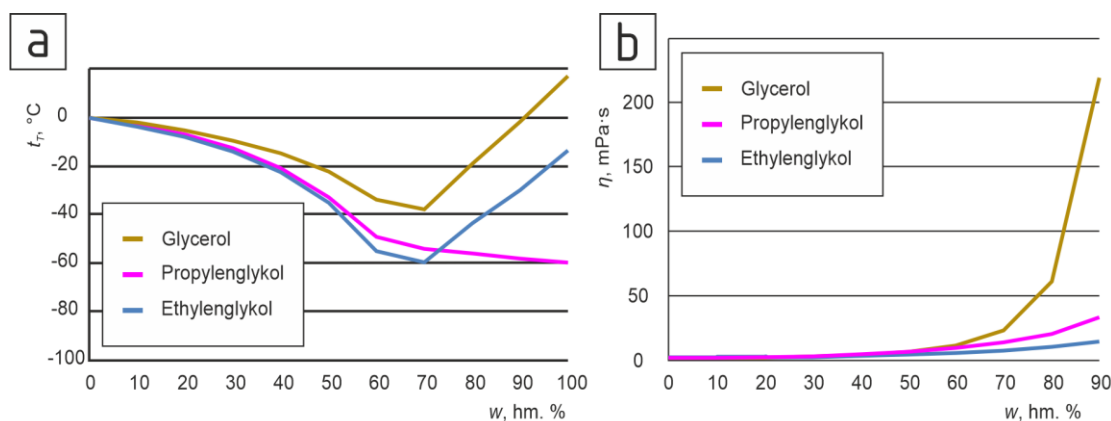
tab. 2-3 Parametry neřaděných alkoholů používaných pro de-icing a anti-icing aplikace

Název	IUPAC označení	Vzorec	Hustota	Teplota tání	Dynamická viskozita [27 °C]	Tenze par (20 °C)
Glycerol	Propane-1,2,3-triol	$C_3H_8O_3$	1,261 g·cm ⁻³	17,8 °C	0,95 Pa·s	<1 Pa
Propylenglykol	Propane-1,2-diol	$C_3H_8O_2$	1,036 g·cm ⁻³	-59 °C	0,042 Pa·s	10 Pa
Etylenglykol	Ethane-1,2-diol	$C_2H_6O_2$	1,113 g·cm ⁻³	-12,9 °C	0,016 Pa·s	6 Pa

V technické praxi se tyto kapaliny používají zředěné vodou, se kterou jsou všechny neomezeně mísitelné. To je pochopitelné, protože zmíněný glycerol má v nezředěném stavu vysokou teplotu tání téměř 20 °C. Ovšem při zředění s vodou lze dosáhnout nižších teplot tání, což je zobrazeno v grafu na obr. 2-15 a). Mísení s vodou lze také dosáhnout nižší viskozity směsí, což dokazuje graf závislosti viskozity na teplotě a koncentraci směsi propylenglykolu a vody, jež je zobrazen na obr. 2-14 a). Kapaliny lze také míchat mezi sebou a je tak možné dosáhnout optimálních hodnot teploty tání a viskozity. Diagram na obr. 2-14 b) ukazuje závislost teploty tuhnutí na poměru směsi vody, glycerolu a etylenglykolu.



obr. 2-14 a) Teplota tuhnutí směsi glycerolu s vodou [38], b) Diagram závislosti teploty tuhnutí na poměru glycerolu, ethylenglykolu a vodu ve směsi [39]



obr. 2-15 Hodnoty a) teploty tání t_T [°C] a b) dynamické viskozity η [mPa·s] pro směsi glycerolu, propylenglykolu a ethylenglykolu s vodou při různých hmotnostních poměrech [40] (upraveno)

Reologickými, tepelnými a dalšími vlastnostmi alkoholů, jakožto základní složkou teplonosných kapalin, se věnoval ve své disertační práci Skolil [40]. Uvádí, že jednosytné alkoholy s jednou hydroxylovou OH skupinou mají nízkou teplotu varu a vysokou hořlavost, i pokud jsou součástí vodného roztoku. Zároveň alkoholy s delšími řetězci a vícesytné s větším počtem (-OH) skupin dosahují vyšší viskozity. Mají také vyšší cenu a horší dostupnost. Tyto vlastnosti jsou klíčové i pro použití u de-icing a anti-icing kapalin. Proto jsou nejčastěji používány právě zmiňované alkoholy s krátkými řetězci a nanejvýše trojsytné, tak jako je glycerol. Na obr. 2-15 je zobrazena teplota tání a dynamická viskozita těchto kapalin ve směsi s vodou při různých hmotnostních poměrech. Zajímavým údajem je také cena těchto kapalin, jež ukazuje tab. 2-4.

tab. 2-4 Hodnoty spotových cen glycerolu, propylenglykolu a ethylenglykolu na trhu v ČR z roku 2015 [40]

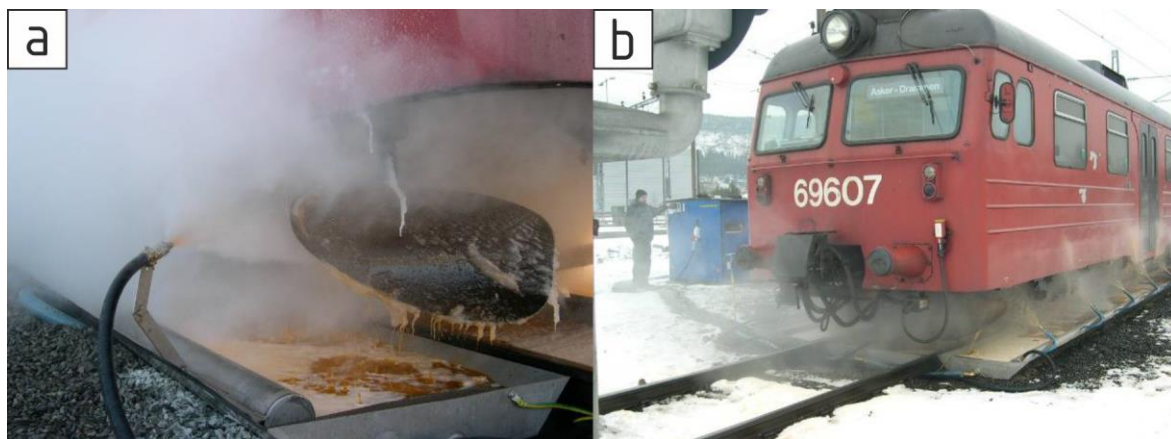
	Glycerol	Propylenglykol	Etylenglykol
Cena (EUR/t)	500–540	950–1000	1240–1290
w (hm. %)	99,5	99,9	99,5

Propylenglykol a ethylenglykol nacházejí uplatnění především v letecké dopravě jako základ kapalin proti námraze. Jejich použití se řídí dle norem ISO 11 075 [41] a ISO 11 078 [42]. Zmíněné normy popisují nároky na čtyři typy protinámrazových kapalin používaných v letectví. První zmíněná norma definuje nároky na kapalinu I. typu. Ta je používána primárně pro odstranění námrazy z letadla. Pro tyto potřeby se značně ředí vodou a aplikuje se na povrch letadla při teplotě kolem 70 °C a tlaku 0,7 MPa [43]. Hlavním mechanismem je tady především působení tepla a tlaku, a proto by bylo použití kapaliny s vyšším obsahem alkoholu nevhodné a nešetné k životnímu prostředí. Navíc alkoholy mají nižší měrnou tepelnou kapacitu. Takto je tepelným působením vrstva námrazy zeslabena a následně díky tlaku kapaliny rozbita. Kapaliny II., III a IV. typu popsané v druhé zmíněné normě slouží primárně k ochraně před vznikem námrazy. Jedním z rozdílů je příměs polymerních částic, které mění chování kapaliny na pseudoplasické. Dále jsou méně ředěny, což v kombinaci s vyšší koncentrací alkoholu znamená vyšší viskozitu, a tudíž lépe ulpí na povrchu letadla.

Běžně je povrch letadla zbaven námrazy pomocí kapaliny I. typu. Následně je na jeho povrch aplikována kapalina II. nebo IV. typu zajišťující ochranu před námrazou do startu a v jeho průběhu. Kapalina III. typu se pak uplatňuje především pro menší letadla létající nižšími rychlostmi a kombinuje vlastnosti kapalin prvních dvou typů.

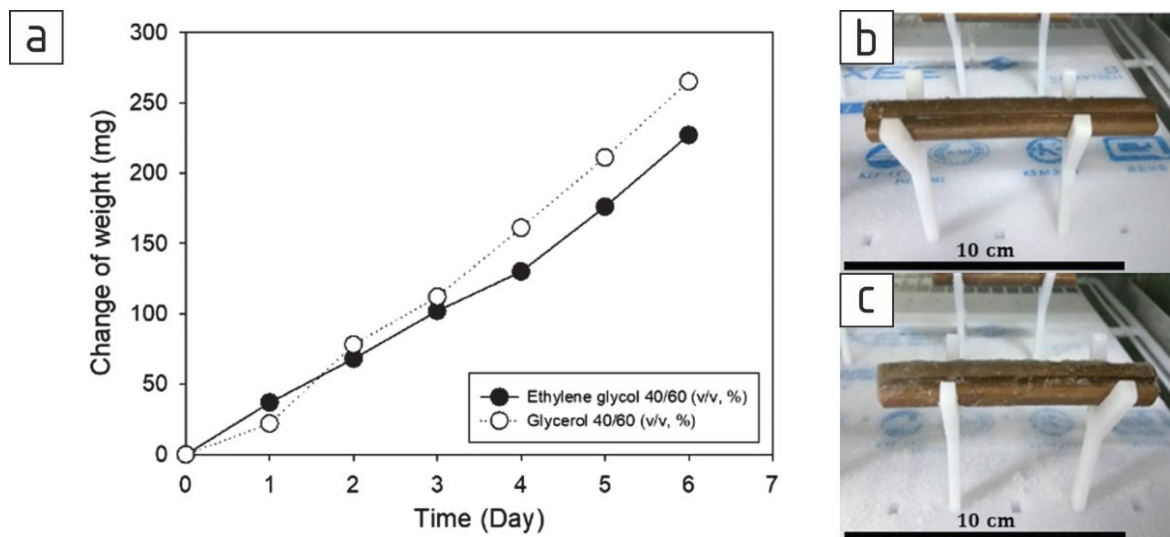
Výše zmíněné normy definují kromě nároků na dobu ochrany před námrazou také parametry jako: viskozitu, korozivní agresivitu vůči vybraným leteckým materiálům, teplotu vzplanutí, biodegradabilitu, pH, ale třeba i barvu. Pro naplnění některých z těchto nároků se do kapalin přidávají přísady. Především se jedná o inhibitory koroze jako například benzotriazol. Dále jsou to přísady pro snížení povrchového napětí jako alkylnyfenoly, například nonylfenol. Ty zajistí vytvoření souvislé vrstvy protinámrazové kapaliny na povrchu letadla. Pro zajištění pseudoplastického chování pak slouží nelineární polymery s vysokou molekulární hmotností.

Podobný princip ochrany před námrazou se užívá i u vysokorychlostních, případně konvenčních vlaků, kde se v zimních měsících na skříň vlaku, sběrače nebo podvozky nanese vrstva protinámrazové kapaliny. Ta také zabraňuje vzniku námrazy, jež by mohla ohrozit funkci vozidla. Nároky na kolejová vozidla provozovaná v prostředí s dlouhou zimou a nízkými teplotami se věnoval ve své práci [44] Bettez. Jako kritická místa identifikoval zejména sběrače proudu a podvozky. Systémy proti námraze a sněhu se využívají především v severských zemích jako je Norsko, Švédsko nebo severní japonské ostrovy. Nanášení je obvykle automatizované pomocí trysek, které jsou umístěny kolem servisní koleje. Příkladem může být zařízení v Dramen (Norsko) zobrazené na obr. 2-16.



obr. 2-16 Zařízení pro odstranění námrazy v Dramen, Norsko, která využívá směsi s propylenglykolem a) detail na trysku a pluh lokomotivy, b) celkový pohled na zařízení při funkci [44]

Výzkumem směsí přímo ve vztahu k námraze trolejového drátu se zabýval Kim a kol. [45]. Jejich cílem bylo zjistit vliv směsi alkoholu na vznik námrazy na vzorku trolejového drátu délky 100 mm a průřezu 120 mm². Pro jejich experimenty byly užity směsi etylenglykolu a glycerolu s vodou. Experiment spočíval v nanášení vrstvy směsi alkoholu na vzorek trolejového drátu a jeho následné hluboké zmrazení na teplotu -40 °C. Hodnotícím kritériem zde byla hmotnostní změna. Výsledky šestidenního testování jsou vidět na obr. 2-17 a).



obr. 2-17 a) hmotnostní změna velikosti námrazy měřena po dnech pro směsi etylenglykolu a glycerolu, b), c), fotografie vzorku troleje pokrytého směsí glycerolu při testování po jednom dni, respektive po pěti dnech hlubokého zmrazení na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Pro potřeby ochrany trolejového drátu je dnes na trhu několik směsí proti námraze. Ty jsou nicméně velmi často dodávány společně s nanášecím systémem, proto budou i tyto systémy a jejich základní popis v této části zmíněny. Dále jsou na trhu univerzální směsi proti námraze, které jsou nicméně také užívány pro ochranu trolejového drátu a také zde budou zmíněny.

Pantotec DK

Švýcarská společnost *Igralub*, zabývající se mazacími systémy, má ve své nabídce systém pro nanášení směsí proti námraze na trolejových vedení [46]. Systém aplikuje směs pomocí trysek umístěných na upraveném sběrači. Tento systém je dodáván jak ve verzi pro tramvajovou dopravu, tak i ve verzi pro trolejbusy. Pro tento systém je využíváno směsí s obchodním názvem *Pantotec DK* od stejné firmy. Jedná se o směs na bázi alkoholů zřejmě především propylenglykolu, a to na základě uváděné viskozity a uváděné netoxicity produktu. Ta by značila použití etylenglykolu. Dále obsahuje také polymery a další aditiva, přičemž pevné přísady tvoří nejméně 2 % objemu. Výrobce garantuje vysokou přilnavost produktu k trolejovému drátu při zachování maximální vodivosti mezi sběračem pantografu a vedením. Funkce směsi je garantována až do teploty $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro aplikace se směs míchá s vodou v poměru 1:2 pro teploty vyšší než $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při nižších teplotách se množství směsi zvýší a míšící poměr je 1:1. Výrobek je primárně určen pro aplikování nástřikem pomocí systému výrobce, kdy je ovšem nezbytné výrobek ředit nejméně 1:1. Výrobce nabízí použití produktu i v kombinaci s jiným nanášecím systémem, kde lze v případě kontaktního nanášení použít směs nezředěnou. Podle výrobce by výdrž směsi měla dosahovat několik dní ovšem při počasí bez srážek. V případě výrazných srážek v podobě deště nebo sněžení je nutné směs znovu aplikovat.

Profil Pro

Další švýcarská firma *Kummler+Matter AG* se zabývá stavbou trolejových vedení pro železniční, tramvajové a trolejbusové tratě. Jako doplňkový produkt nabízí systém proti námraze nazývaný *Profil 1500V* [17]. Systém je dodávaný včetně aplikační směsi *Profil Pro* od společnosti *Strub*, která je založena na propylenglykolu. Systém je použitelný jak pro ochranu trolejového drátu před námrazou, tak i pro její odstraňování. Zařízení je navrženo pro užití na tratích elektrifikovaných stejnosměrným proudem do hodnoty 1500 V. Mimo to výrobce uvádí, že aplikací této směsi je současně dosaženo redukce opotřebení uhlíkového obložení smýkadla sběrače a samotného trolejového drátu. V případě bezesrážkového počasí je směs schopna plnit svoji funkci 5 až 7 dní. Následně je nezbytné směs znovu aplikovat. Směs je primárně navržena pro rozmezí teplot -15 až 0 °C při poměru míchání s vodou 1:2.

Kilfrost Rail

Anglická společnost *Kilfrost* je jedním z lídrů na trhu ve výrobě směsí proti námraze letadel a také náplní do tepelných zařízení. Mimo jiné se zabývá výrobou směsí proti námraze pro kolejovou dopravu, konkrétní produktovou řadou *Kilfrost Rail* a *Kilfrost Rail Plus* [47]. Obě kapaliny vynikají vysokou hodnotou kinematické viskozity, kterou lze přičítat použitím zahušťovadel. Kapaliny jsou určeny především pro britský trh a aplikaci na napájecí třetí kolejnici. V případě druhé zmíněné kapaliny je výrobcem přímo uvedeno použití přísad pro zajištění pseudoplastického chování kapaliny. Její receptura je blízká kapalinám IV. typu používaných v letectví. Této kapaliny je užito i v případě aplikace na kolejové vozidlo pomocí stacionárního zařízení, tak jako v případě francouzských drah SNCF pro jejich vysokorychlostní jednotky [48]. Obě kapaliny jsou na bázi propylenglykolu s výbornými adhezivními vlastnostmi. Kromě omezení vzniku námrazy je tento produkt schopen potlačit vznik koroze. Produkt je určen zejména pro teploty do -25 °C.

Interflon Lube EPR

Italská firma *Dipsa Technes* vyvíjí systém pro aplikaci směsi proti námraze s obchodním názvem *FroSTOP* [19] popsany v předchozí kapitole. Systém k nanášení využívá jediné aplikační trysky. Pro aplikaci na trolejový drát používá speciální směs, která neobsahuje alkoholy. Jedná se o výrobek firmy *Interflon* s označením *Lube EPR* [49]. Jejím základem je směs minerálních a rostlinných olejů a má nízkou teplotu tuhnutí -45 °C. Obsahuje přísady pro snížení pění, odpěňovadla, především však obsahuje teflonové částice o velikosti 0,05 až 15 μm. Kapalina je při aplikaci spolu s částicemi teflonu nabitá elektrostatickým nábojem pomocí nanášecího zařízení. To zajistí pevné přilnutí částic teflonu na povrch trolejového drátu a vytvoření kluzné a hydrofobní vrstvy. Samotná vrstva částic teflonu vykazuje velice nízkou smykovou pevnost a stýkající se povrch opatřené vrstvou této kapaliny dle výrobce vykazují nízký součinitel tření 0,06. Nevýhodou je nutnost aplikace při odpojení napájení troleje. Díky tomuto způsobu aplikace a nemísitelnosti kapaliny s vodou je výdrž kapaliny na trolejovém drátu dle výrobce 30 až 60 dní.

Fridex Eko

Další možností pro odstranění a ochrany před vznikem námrazy představuje produkt *Fridex Eko* [50] od české firmy *Velvana*. Jeho základem je propylenglykol s inhibitory koroze, stabilizátory a odpěňvadlem. Tento produkt je primárně určen jako netoxický ekvivalent mnohem známějšího fridexu, který je založen na etylenglykolu. Stejně jako on je určen jako teplotnosná kapalina do chladicích systémů. V neředěné formě se jedná o hořlavou kapalinu. Při ředění s vodou v poměru 1:1 dosahuje teplotu tuhnutí $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tento produkt je využíván například *Dopravním podnikem města Brna* pro eliminaci námrazy z trolejového vedení trolejbusů [51]. K tomu používaný systém označovaný jako „*Slintač*“ vznikl dílenskou úpravou a je instalován na servisním trolejbusu. Systém není komerčně nabízen. Podobný systém využívající *Fridex Eko* je používán dopravním podnikem v Ostravě. Je také vzniklý dílenskou úpravou a má označením *ČARK 01*. Ve firemním zpravodaji [52] je toto zařízení stručně popsáno. V něm je také uveden mechanismus na základě, kterého je povolán k aplikaci směsi. To se děje na základě meteorologické předpovědi. Pokud se předpokládá pokles teploty rosného bodu pod bod mrazu. Obě zařízení pomocí kompresoru přivádí do oblasti smýkadla tyčového sběrače kapalinu, takže trolejový drát je do směsi namáčen.

Glycerol

Jeden ze systémů proti námraze používá k aplikaci na trolejový drát prostý roztok čistého glycerolu s vodou. Jedná se o zařízení příznačně nazvané *Non-Icing-System* (zkratka *NIS*) od společnosti *STEMMANN-TECHNIK* [13]. Zařízení aplikuje kapalinu kontaktně a bylo popsáno v předchozí části práce. Dle údajů výrobce by aplikovaný roztok měl na troleji vydržet 2 až 3 dny v závislosti na počasí. Výrobce také slibuje snížení opotřebení smýkadla a trolejového drátu. Výrobce u systému uvádí spotřebu 20 l na 100 km. Pro aplikaci je využívána směs čistého glycerolu s vodou o koncentraci 83 %. V dnech, kdy hrozí vznik námrazy, je směs aplikována denně, a to v nočních hodinách, kdy je jinak zastaven provoz. Oproti doporučení výrobce bylo u brněnského dopravního podniku dle zkušeností se zařízením dávkované množství sníženo a jako dostatečné se ukázalo dávkování přibližně 10 l na 100 km. Maximální přípustná rychlost pro aplikaci je 30 km/h.

Zero Gravity

Britská společnost *MidWest* zabývající se vývojem technologií pro široké spektrum průmyslových aplikací nabízí ve svém katalogu také systém proti namrzání napájecí třetí kolejnice. Systém je označován jako *Ice-Slicer*. Součástí systému je i speciální kapalina *Zero Gravity*. Zmíněná kapalina je založená na směsi propylenglykolu, diethylenglykol, vody a dalších přísad. Kromě inhibitorů koroze kapalina obsahuje zahušťovadla, která výrazně zvyšují hodnotu viskozity. To může vést k lepší přilnavosti k povrchu na který je aplikován. Přísady dle výrobce mění chování kapaliny na pseudoplastické s nenulovou mezí toku, což zaručuje ulpění kapaliny na povrchu i během výrazných dešťových nebo sněhových srážek, případně větru.

2.5 Námraza

Pojmem námraza se v technické praxi a běžné mluvě často označuje atmosférický jev, který má v meteorologii označení námrazové jevy. Na základě informací z Meteorologického výkladového slovníku vydaného Ministerstvem životního prostředí [53] a Online Meteorologického slovníku vydaného Českou meteorologickou společností [54] byly tyto jevy pro potřeby této práce popsány. Námrazové jevy je souhrnné označení pro krystalickou námrazu (jinovatku), zrnitou námrazu (často označovanou zkráceně námraza) a průsvitnou námrazu. Námrazové jevy lze pak počítat mezi námrazky, což je pojem nadřazený a označuje navíc ještě ledovku a mokrý sníh. Všechny tyto jevy spojuje depozice vody v pevném skupenství na povrchu těles. Jejich vznik je spojen především se zimními měsíci, konkrétně v našich zeměpisných podmínkách, listopad až březen, což potvrdila ve své práci [55] Škodná na základě analýzy dat Českého hydrometeorologického úřadu. Všechny typy námrazových jevů se liší způsobem vzniku i svým vzhledem, ovšem přechod mezi jednotlivými typy není přesně ohraničen, protože i podmínky, za kterých vznikají, nebývají zřetelně vymezeny. Základní rozlišovací znak námrazových jevů je především hustota, jež je pro jednotlivé typy námrazových jevů shrnuta v tab. 2-5.

tab. 2-5 Tabulka typů námrazových jevů [56] (upraveno)

Typ námrazkového jevu	Anglický překlad	Teplota vzduchu při vzniku	Hustota
Krystalická námraza (Jinovatka)	soft rime	méně než - 8 °C	0,1 ÷ 0,2 g cm ⁻³
Zrnitá námraza (Námraza)	hard rime	-10 až -2 °C	0,2 ÷ 0,5 g cm ⁻³
Průsvitná námraza	clear ice	-3 až 0 °C	0,6 ÷ 0,7 g cm ⁻³
Ledovka	glaze ice	-3 až 0 °C	0,7 ÷ 0,9 g cm ⁻³
Mokrý sníh	wet snow	-2 až 5 °C	0,5 ÷ 0,8 g cm ⁻³

2.5.1 Typy námrazových příbuzných jevů

Krystalická námraza (jinovatka)

Křehká krystalická neprůhledná usazenina mléčného zbarvení viz. obr. 2-18 a). Vzniká při teplotě méně než - 8 °C náhlým zmrznutím přechlazených vodních kapiček mlhy rozptýlených ve vzduchu, především však desublimací vzdušné vlhkosti. Tvoří struktury vzhledu jemných jehel a šupinek. Díky její křehkosti se dá snadno mechanicky odstranit při jízdě i samotným sběračem, a tudíž netvoří pro významné nebezpečí pro kolejovou dopravu.

Zrnitá námraza (námraza)

Zrnitá neprůhledná usazenina obvykle mléčné barvy. Vytváří obvykle krystalky ve tvaru větviček složených z ledových zrněk oddělených vzduchovými mezerami viz. obr. 2-18 b). Vzniká také z vodních kapiček mlhy nebo desublimací vzdušné vlhkosti přibližně při teplotách -2 °C až -10 °C, tedy při vyšších teplotách než krystalická námraza. Je poměrně přilnavá, a tak její odstranění není tak snadné jako v případě krystalické námrazky.

Průsvitná námraza

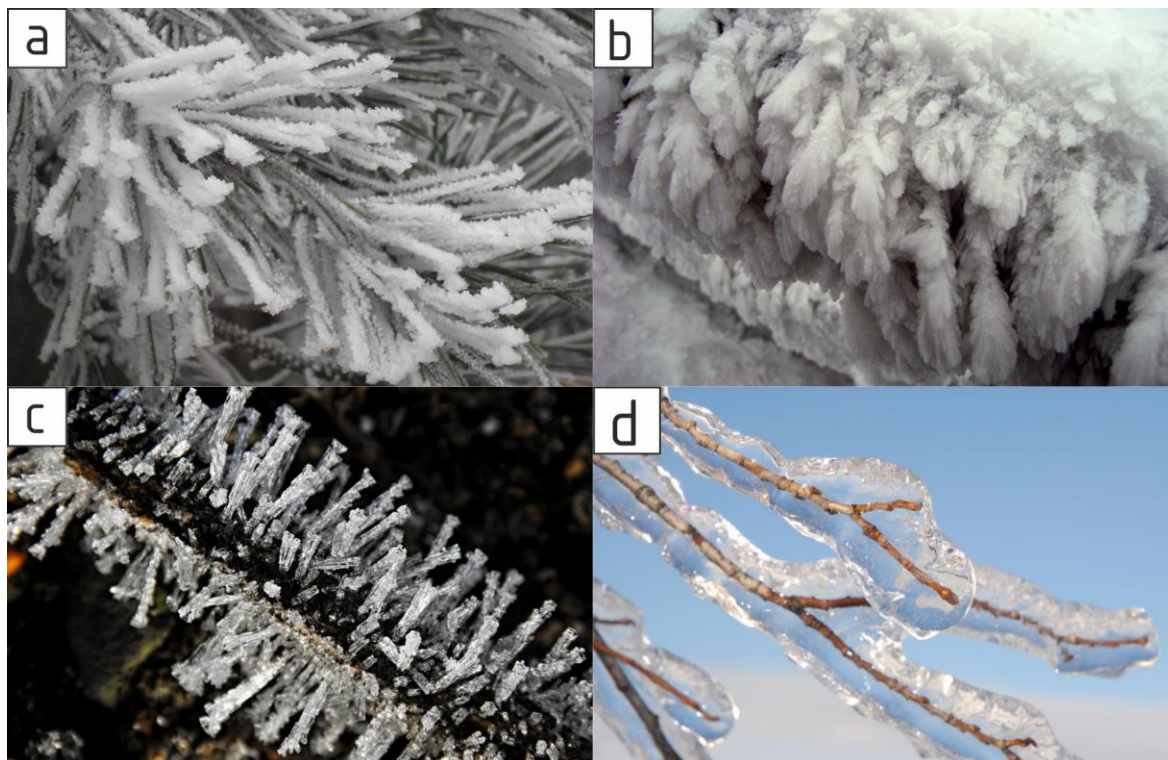
Hladká homogenní a obvykle průsvitná usazenina ledu s drsným povrchem viz. obr. 2-18 c). Na rozdíl od přechozích popisovaných forem námrazy je převážně amorfní. Vzhledem se podobá ledovce, na rozdíl od ní však vzniká pomalým mrznutím kapiček mlhy nebo desublimací vzdušné vlhkosti. Její homogenita je vysvětlována nižší rychlostí přeměny skupenství, jež dává možnost kapalné vodě zaplnit mezery na povrchu předmětů. Díky své homogenní struktuře je mnohem pevnější než předchozí jmenované typy námrazy, také je výrazně přilnavější. Její odstranění je možné pouze rozbitím nebo roztáním.

Ledovka

Hladká souvislá a homogenní průhledná amorfní vrstva ledu viz. obr. 2-18 d). Vzniká okamžitým zmrznutím přechlazených, ale i nepřechlazených, vodních kapek mrznoucího deště nebo mrholení. Při dopadu na povrchy předmětů, jejichž teplota je záporná nebo i blízká nule. Má vyšší hustotu než průsvitná námraza a také vzniká rychleji.

Mokrý sníh

Intenzivní sněhová srážka tvořená vlhkými vločkami velkých rozměrů. Vzniká při teplotách blízkých nule či vyšších než $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Takto vzniká velmi rychle mohutná vrstva sněhu, která je nebezpečná především svojí tíhovou silou působící na trolejové vedení. Rozdílem od předchozích typů námrazků je tedy v tom, že k přeměně skupenství nedochází přímo na povrchu těles, ale ještě ve vzduchu.



obr. 2-18 Vzhled námrazků; (a) krystalická námraza; (b) zrnitá námraza; (c) průsvitná námraza; (d) ledovka [25][57][58].

2.5.2 Vznik námrazových a příbuzných jevů

Jak je skrze výše popsané typy námrazků nastíněno, k jejich vzniku může docházet třemi různými mechanismy: desublimací vzdušné vlhkosti, mrznutím kapek nebo kapiček deště, respektive mlhy, případně sněžením. V případě desublimace se jedná o situaci, kdy teplota povrchu namrzajícího povrchu leží pod teplotou rosného bodu vzduchu. Což je teplota, při které vzduch zcela nasycen vodní párou a při dalším ochlazení začíná kondenzovat. Zároveň musí být teplota povrchu nižší než 0 °C, protože jinak by voda na povrchu kondensovala v kapalném skupenství. Kondenzační teplotu lze určit na základě relativní vlhkosti vzduchu a jeho teploty viz. rovnice (2-3). V reálném světě ovšem může docházet k přechlazení vzduchu. To znamená, že vzduch zchladne natolik, že relativní vlhkost přesáhne 100 %. To nastává ve velkém objemu vzduchu, ve kterém zároveň není obsaženo dostatečné množství kondenzačních jader. Takto se pak vzduch nachází v metastabilním stavu, který při kontaktu s povrchem rychle vysráží a zmrzne.

$$T_{dp} = \frac{243,5 \cdot \ln\left(\frac{\varphi}{100} \cdot e^{\frac{17,67 \cdot T}{243,5 \cdot T}}\right)}{17,67 - \ln\left(\frac{\varphi}{100} \cdot e^{\frac{17,67 \cdot T}{243,5 \cdot T}}\right)} \quad (2-3)$$

T_{dp}	teplota rosného bodu	[°C]
φ	relativní vlhkost vzduchu	[%]
T	teplota vzduchu	[°C]

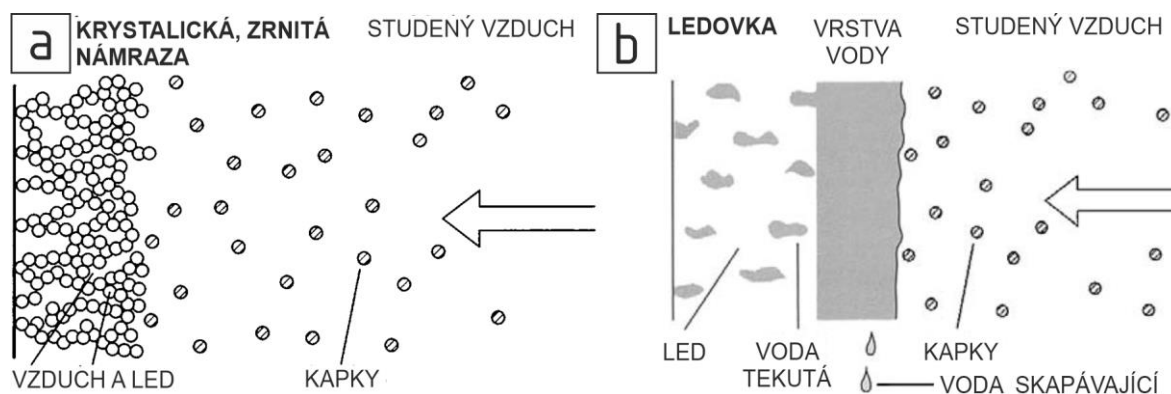
K mrznutí kapek, kapiček nebo mlhy na povrchu těles dochází v případě, že jsou tyto útvary přechlazené a dopadají na povrch, jehož teplota se pohybuje kolem 0 °C nebo pokud je teplota povrchu výrazně pod bodem tání vody, případně pak kombinací obojího. Zmiňované částice hydrometeorů se liší mechanismem vzniku, lze je ale také dělit dle velikosti viz tab. 2-6. Důležité je také brát zřetel, že mlha je lidským okem pozorovatelná, protože je tvořena mikroskopickými kapkami vody. Naopak vzduch dosahující 100% relativní vlhkosti je zcela průhledný.

tab. 2-6 Tabulka velikosti kapalných částic při různých meteorologických jevech, vytvořeno dle údajů v meteorologickém slovníku [54]

Typ jevu	Název	Velikost obvyklá	(maximální rozsah)
Mlha	Kapka oblačná	10 ÷ 20 μm	(< 0,1 mm)
Mrholení	Kapka mrholení (kapička)	0,3 mm	(0,1 ÷ 0,5 mm)
Děšť	Kapka dešťová	1 ÷ 2 mm	(0,5 ÷ 6 mm)

Námrazové jevy obvykle nevznikají nebo vzniknou jen velmi ve malé míře, pokud je teplota vzduchu nižší než -12 °C, což uvádí na svém webu Český hydrometeorologický úřad [59]. To je způsobeno, že při takto nízkých teplotách se ve vzduchu voda v kapalném skupenství nevyskytuje a měrná vlhkost vzduchu velice nízká, a to i při 100% relativní vlhkosti.

V případě lepkavého sněhu je proměna do tuhého stavu uskutečněna ještě před dopadem na povrch. Nicméně lepkavý sníh je nebezpečný především v situacích, kdy vločky dopadající na povrch obsahují vyšší množství vody. Díky tomu může právě touto vodou přimrznout k již vytvořené vrstvě. Takto se pak může na drát velice rychle navázat veliké množství sněhu s velkou hmotností. Při nízkých teplotách $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a méně dochází ke sněhovým srážkám vzácně a výsledná sněhová pokrývka je podobná spíše sypkému substrátu s téměř nulovou kohezí a adhezí při hustotě přibližně $0,1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.



obr. 2-19 Grafické znázornění mechanismů vzniku a) námrazy krystalické a zrnité, je zde patrné, že výsledná struktura má nižší hustotu díky množství vzduchových kapes, b) mechanismus vzniku ledovky z mrznoucího deště [2]

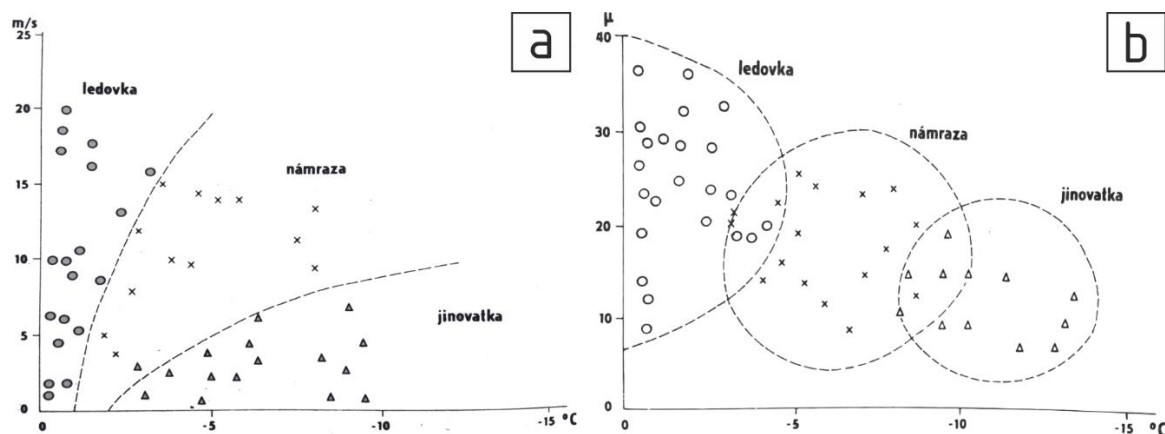
Odlíšný mechanismus vzniku námrazy a ledovky popisuje Farzaneh v knize zabývající se námrazou elektrorozvodných sítí [2]. Tvrdí, že v případě vzniku námrazy dopadající kapky vody ihned na povrchu mrznou a nemohou se rozlít po celém povrchu, viz obr. 2-19 a). Tím dochází k tvorbě vzduchových kapes snižující celkovou hustotu námrazy. V případě ledovky, viz obr. 2-19 b), dopadající kapky tuhnu pomaleji a stihnou se rozlít i do případných povrchových nerovností. Díky tomu vznikne monolit, který je díky tomu transparentní. Pro vznik námrazy identifikoval jako klíčové parametry:

- obsah vody v oblaku mlhy,
- distribuce velikosti kapek vody,
- teplota vzduchu,
- rychlost větru a směr proudění větru,
- relativní vlhkost vzduchu,
- povrchová teplota.

Naopak faktory, které ovlivňují vznik ledovky a mokrého sněhu, jsou mírně odlišné:

- míra srážek,
- povrchová teplota,
- obsah vody ve sněhových vločkách,
- rychlost větru a směr proudění větru,
- teplota vzduchu,
- relativní vlhkost vzduchu.

Vrána a kol. se v knize [56] zabývá námrazou elektrorozvodných sítí na našem území. Na základě terénních měření identifikoval klíčové meteorologické veličiny, vedoucí ke vzniku různých typů námrazy. Jmenovitě to je závislost typu námrazy na rychlosti větru a vzdušné teplotě zobrazený na obr. 2-20 a), a pak také typ námrazy v závislosti na velikosti oblačných kapek mlhy a teplotě vzduchu na obr. 2-20 b). Dalším důležitým faktorem pro vznik námrazy identifikoval množství kondenzačních jader ve vzduchu.



obr. 2-20 a) Závislost druhů námrazy na teplotě vzduchu a rychlosti větru; b) Závislost velikosti kapiček vody ve vzduchu společně s teplotou vzduchu na typu vzniklé námrazového jevu [56]

2.5.3 Fyzikální model růstu námrazy

Pro potřeby především energetických přenosových sítí byly vytvořeny modely, pomocí kterých se dá předpovídat množství vzniklé námrazy na vodiči v čase. Jedním z takových je Makkonenův model, užívaný v normě ČSN ISO 12 494 [60], která se zabývá zatížením konstrukcí námrazou. Tento model lze matematicky vyjádřit dle diferenciální rovnice (2-4) [2]. Slouží pro vyjádření růstu námrazy zejména na kruhových vodičích při působení běžných atmosférických podmínek a působení mrznoucího deště, nebo lepkavého sněhu.

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \rho w A \quad (2-4)$$

kde:

M	hmotnost námrazku	[kg]
t	čas	[s]
ρ	hustota vody	[kg/m ³]
w	rychlost proudění vzduchu kolmo na růst námrazy	[m/s]
A	plocha průřezu o průměru D	[m ²]
α_1	součinitel efektivity kolize	[-]
α_2	součinitel efektivity přilnavosti	[-]
α_3	součinitel efektivity růstu	[-]

Všechny tři zmíněné součinitele $\alpha_1\alpha_2\alpha_3$ dohromady tvoří korekční faktor, který nabývá hodnoty mezi nulou a jedničkou. Dohromady popisují, jaké množství vody zůstane na povrchu drátu a vytvoří námrazu. V případě, že všechna dopadající voda zůstane na povrchu a zmrzne, bude korekční faktor jedna. Ze vzorce je též patrné, že pokud se na vodiči začne vytvářet námraza, její rychlost růstu se bude zvyšovat. To je způsobeno rostoucím průřezem vodiče zvětšený o vrstvu námrazy.

Součinitel efektivity kolize α_1 , vyjadřuje míru, s jakou budou částičky vody kolidovat s povrchem vodiče. Pro jeho určení lze využít dvě bezrozměrná čísla Stokesova K a Langmuierova φ , které je funkcí Stokesova a Reynoldsova čísla, Re .

$$K = \frac{\rho_w d^2 v}{9\mu D} \quad (2-5)$$

$$\varphi = \frac{Re^2}{K} \quad (2-6)$$

$$Re = \frac{\rho_a v d}{\mu} \quad (2-7)$$

d	průměr dopadající kapky	[m]
D	průměr obtékaného válcového tělesa	[m]
ρ_w	hustota vody	[kg/m ³]
ρ_a	hustota vzduchu	[kg/m ³]
v	rychlost volného proudění vzduchu	[m/s]
μ	dynamická viskozita vzduchu	[Pa·s]

Pokud je vodič kruhového průřezu, pak součinitel efektivity kolize α_1 lze popsat dle rovnice

$$\alpha_1 = A - 0,028 - C(B - 0,0454) \quad (2-8)$$

$$A = 1,066K^{-0,00616} \exp(-1,103K^{-0,688})$$

$$B = 3,631K^{-0,498} \exp(-1,497K^{-0,694})$$

$$C = 0,00637(\varphi - 100)^{0,381}$$

Součinitel efektivity přilnavosti α_2 popisuje, jaká míra kapek, respektive i vloček zůstane ulpělá na povrchu vodiče. V případě vodních kapek je tato hodnota vysoká a blíží se $\alpha_2 \approx 1$. Naopak pokud se jedná o sníh, zejména suchý, je hodnota tohoto součinitele téměř nula. Pro určení přibližné hodnoty tohoto součinitele lze použít vztah:

$$\alpha_2 = \frac{1}{v} \quad (2-9)$$

kde v je rychlost větru v m/s. Tento vztah lze použít, pokud je rychlost větru vyšší než 1 m/s. Když je rychlost větru nižší $\alpha_2 = 1$. Což kompenzuje fakt, kdy i suchý sníh zůstává na povrchu drátu, pokud je rychlost větru nízká.

Součinitel efektivity růstu α_3 popisuje tepelnou výměnu mezi kapkami dopadající vody a povrchem. Součinitel popisuje míru vody, která se na povrchu vodiče promění v námrazu. V případě krystalické, zrnité a průsvitné námrazy bude vždy tato hodnota $\alpha_3 = 1$. To znamená, že veškerá voda dopadající na povrch se promění do pevného skupenství. Hodnotu součinitele efektivity růstu lze určit z rovnice:

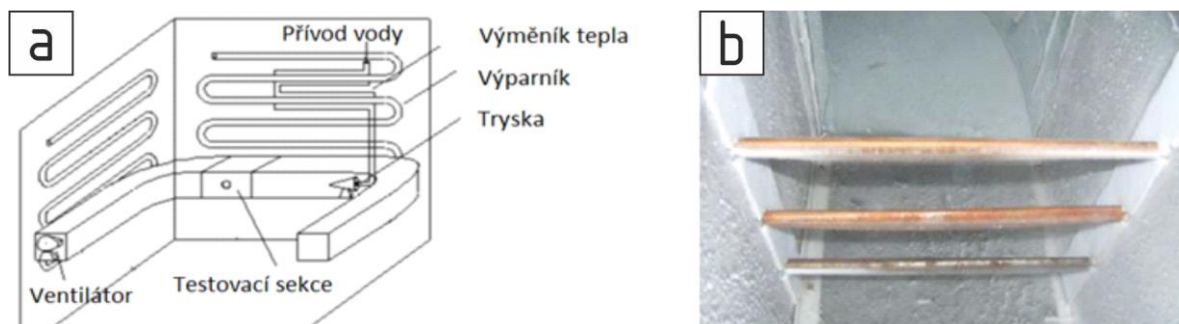
$$\alpha_3 = \frac{Q_f}{F(1 - \lambda)L_f} \quad (2-10)$$

Q_f	Latentní teplo nutné pro přeměnu vody v led	[J]
λ	Podíl vody v srážce	[%]
F	Hmotnostní tok	[kg]
L_f	Skupenské teplo tání pro vodu	[J/kg]

Na základě laboratorních i terénních testů byly stanoveny hodnoty těchto koeficientů při různých meteorologických podmínkách, díky čemuž lze předpovídat množství a typ námrazy dle geografických a jiných kritérií.

2.6 Zařízení pro zkoumání námrazových jevů

Heyun a kol. [21] se v rámci kapitoly knihy v *Reliability and Safety in Railway* zabývali výzkumem námrazy na trolejovém vedení a možnostmi jejího odstranění, případně ochrany před ní. V rámci této studie bylo užito testovací zařízení schematicky zobrazené na obr. 2-21. Zařízení je umístěno v klimatické komoře, která jako chladivo užívá freonu, a tak je možné dosáhnout teplot až $-18\text{ }^\circ\text{C}$. Zařízení se skládá z tubusu vyrobeného z plexiskla o průřezu $350 \times 350\text{ mm}$, kterém nuceně proudí chladný vzduch díky ventilátoru. V tomto tubusu jsou umístěny tři zkušební vzorky trolejového drátu CTS120 o průřezu 120 mm^2 . Před vzorky je umístěna tryska, kterou je do proudícího vzduchu rozprašována voda. Voda do trysky je vedena výměníkem umístěným u výparníku klimatické komory a tím se zároveň ochlazuje. Zařízení umožňuje měnit rychlost proudění vzduchu.



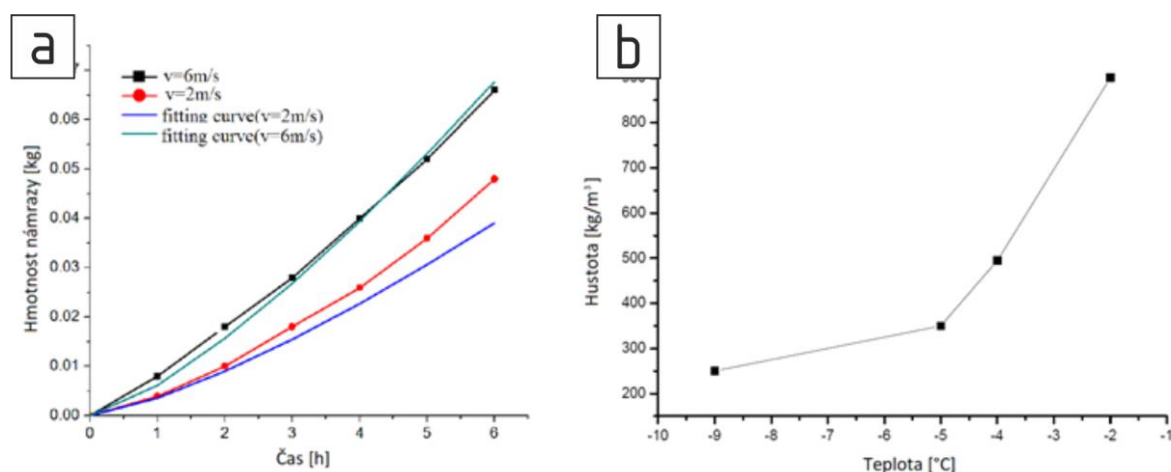
obr. 2-21 a) Schéma testovací komory, b) detail testovací sekce zařízení s upnutými vzorky troleje. [21]

V rámci experimentálního výzkumu se autoři věnovali především vlivu rychlosti proudění a teploty vzduchu na velikost hmotnostního přírůstku námrazy a jejího typu na vzorku trolejového drátu. Tyto experimenty potvrdily, že rychlost proudění má zásadní vliv na tvorbu námrazy. S rostoucí rychlostí proudění dochází k rychlejšímu růstu námrazy, jak je ukazuje graf na obr. 2-22 a). Autoři se dále zabývali možností predikce nárůstu námrazy, kde využili upraveného Imai modelu, viz rovnice (2-11).

$$M = C(w(-T)t)^{4/3} \quad (2-11)$$

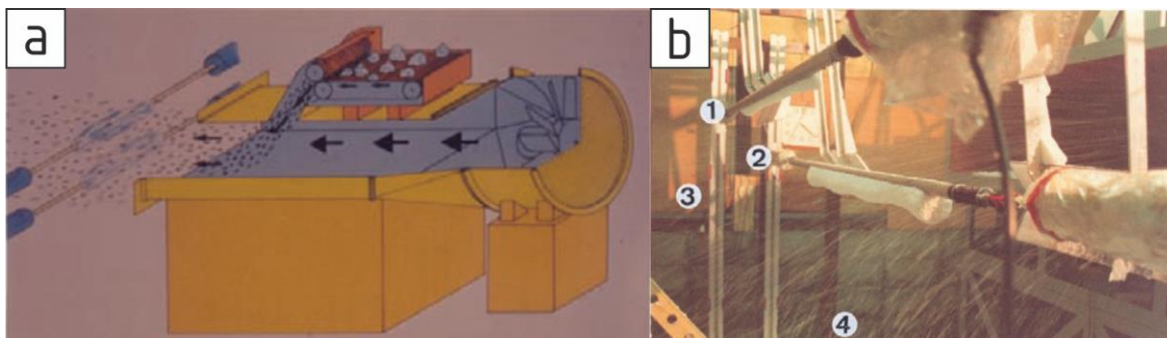
M	hmotnost	[kg]
C	konstanta	[-]
w	rychlost proudění	[m/s]
T	teplota vzduchu	[°C]
t	čas	[h]

Naměřené hodnoty následně posloužili na výpočet koeficientu ve výše zmíněné rovnici a byly též zaneseny do grafu. Rychlost proudění, při kterém byl experiment prováděn, byla 2 m/s a 6 m/s při současné teplotě vzduchu -2 °C.



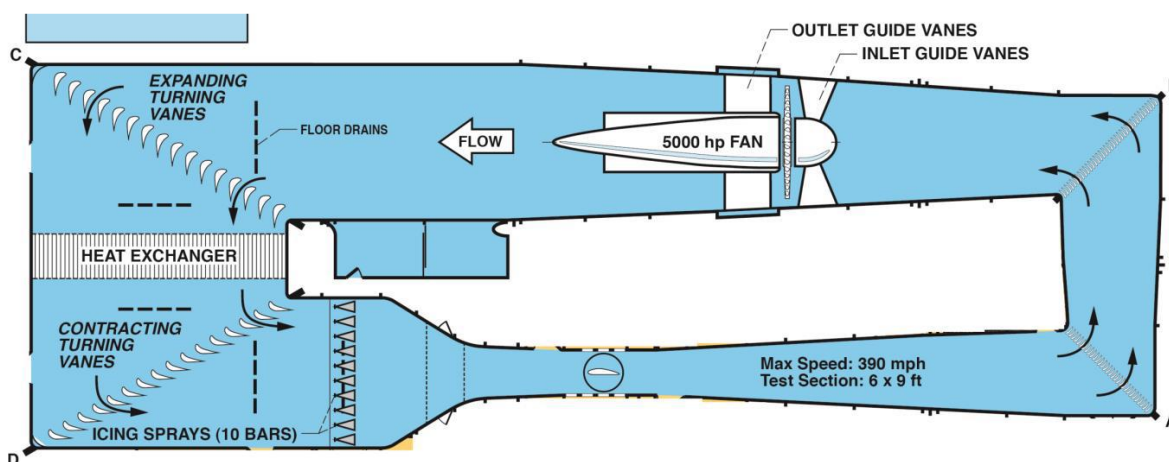
obr. 2-22 a) Graf nárůstu hmotnosti námrazy v čase na zkušebním vzorku trolejového drátu při různých rychlostí proudění, b) Hustota vzniklé námrazy na vzorky při různé teplotě okolního vzduchu [21]

Dále bylo prokázáno, že hustota a tloušťka ledu je silně závislá na teplotě. Při nárůstu teploty sice dochází dle očekávání k redukci tloušťky námrazy, ale hustota ledu výrazně narůstá, což je patrné z obr. 2-22 b). V rámci těchto experimentů byla také identifikována teplota - 4 °C, při které dochází ke změně typu námrazy. V případě, že je teplota vyšší než - 4 °C, pak se na zkušebním vzorku objevuje průsvitná námraza, zatímco při teplotě nižší jde o zrnitou námrazu.



obr. 2-23 Ishiuchi wind tunnel, zařízení pro zkoumání námrazy na vodičích energetických sítí, a) schematické znázornění celého zařízení, b) detail na testované vodiče během experimentu [61]

Dalle a Amirat se ve své práci [61] zabývají růstem vrstvy mokrého sněhu na povrchu drátů elektrických vedení. Ke svému výzkumu využili měření ve větrném tunelu a porovnávali je s měřeními provedenými na skutečných elektrických vedení při standardních meteorologických podmínkách. Využívaný větrný tunel byl Ishiuchi wind tunnel v japonské CRIEPI laboratoři. Schéma zařízení je zobrazené na obr. 2-23 a). Do proudu vzduchu je zde rozprašován sníh. Ten je přírodní a v blocích dopraven do laboratoře. Před rozprašením do proudu vzduchu je rozdrčen pomocí válcového hřebene otáčející se vysokou rychlostí. Při testování se teplota vzduchu pohybovala mezi 0,5 °C až 2 °C a relativní vlhkost vzduchu 85 % až 94 %. Testovaný drát byl běžný vodič pro vedení vysokého napětí pletený z více lan a délce 1,5 m. Vzorek byl umístěn kolmo na proud vzduchu. Na obr. 2-23 b) jsou vidět dva vzorky trolejového drátu, přičemž jeden je na svých koncích vetknut, zatímco druhý měl možnost axiálně rotovat. Z měření vyplývá, že zatímco u vetknutého lana se vrstva sněhu vytvářela pouze na návětrné straně a velikost maximální nárůstu pokrývky je omezená, u rotačně uloženého lana docházelo k téměř neomezenému růstu sněhové vrstvy. To bylo způsobeno otáčením lana kolem své osy při změně těžiště způsobené vrstvou sněhu. Na vodičích byla měřena hustota sněhu a to po ukončení testu. Díky vytvoření relativně homogení válcové vrstvy bylo snadné vypočítat z průměru přibližný objem a vrstva sněhu se následně vážila, tak byla určena hustota. Při rychlosti proudění 3 m/s byla naměřena hustota sněhové vrstvy 100 kg/m³, při 10 m/s pak 400 kg/m³.

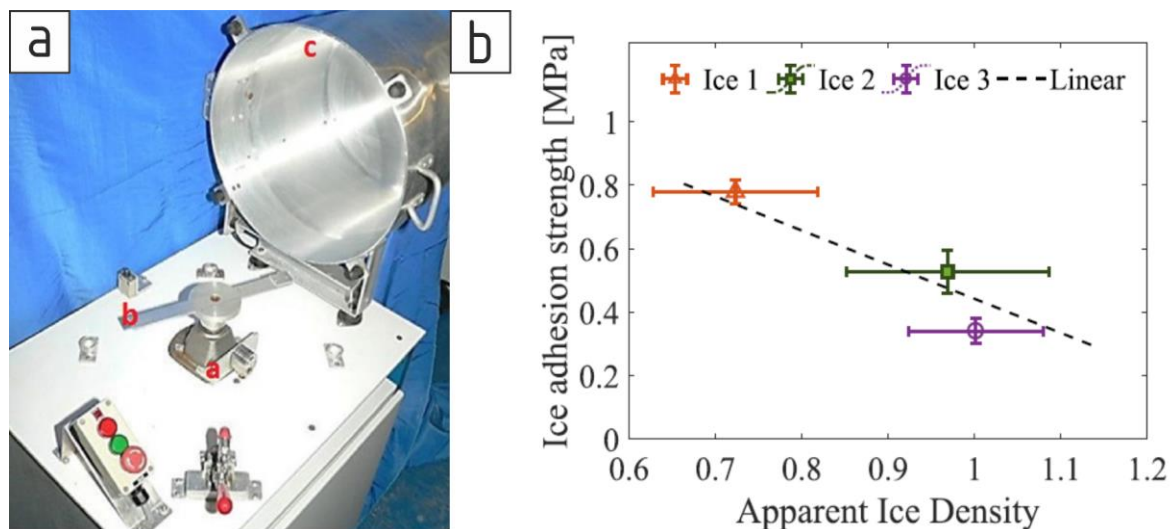


obr. 2-24 Schéma zařízení pro výzkum námrazy Icing Research Tunnel [62]

Steen v článku [62] popisuje zařízení pro studování námrazy umístěné v laboratořích NASA. Toto zařízení nazvané IRT (Icing Research Tunnel) funguje na principu uzavřeného klimatického tunelu s nucenou cirkulací vzduchu. Jeho schématické znázornění je na obr. 2-24. K zajištění cirkulace vzduchu zde slouží elektromotor o výkonu 3700 kW, jež pohání dřevěnou vrtuli o průměru 7,3 m. Regulace teploty je zajištěna skrze tepelný výměník, který umožňuje chlazení i ohřev v intervalu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozměry tepelného výměníku jsou $8\text{ m} \times 16\text{ m}$. Za tepelným výměníkem se nachází deset řad rozprašovacích lišt dvou různých typů. Rozprašovací lišty mají celkem 55 trysek využívající k atomizaci stlačený vzduch a liší se dle velikosti průtoku vody. Každá z trysek je napájena ze dvou potrubí a lze je ovládat skrze elektromagnetické ventily. Zúžení do testovací sekce je 14:1 a ta má tak obdélníkový průřez $1,8\text{ m} \times 2,7\text{ m}$ při délce 6 m. Testování je možné při rychlostech proudění vzduchu od 26 m/s do 167 m/s.

2.7 Adheze námrazy k povrchu pevných těles

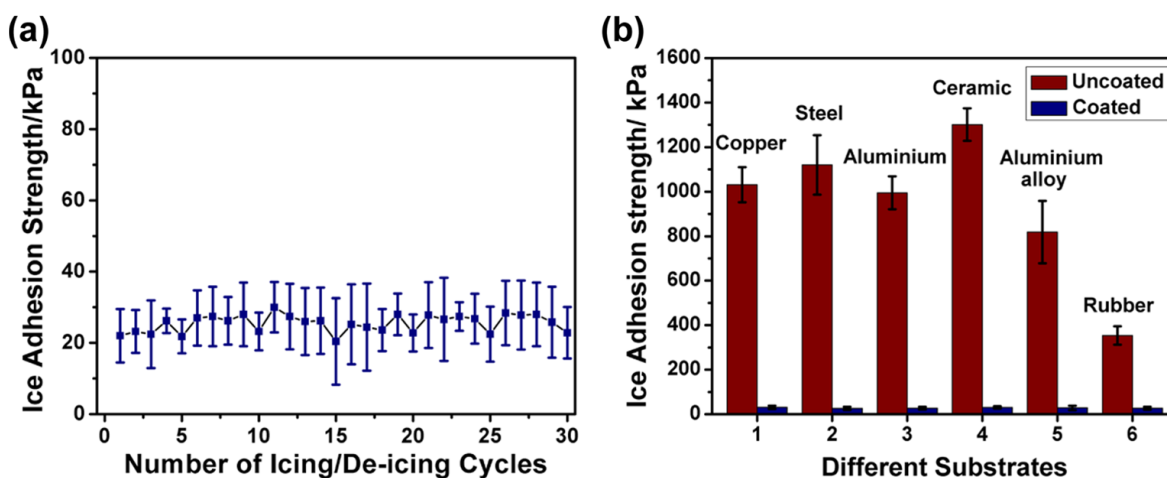
Work a Lian [63] se ve svém článku zabývají zhodnocením měřících metod přilnavosti (adheze) ledu k povrchům tuhých těles. Autoři vycházejí z celkem 113 studií a detailně popisují testovací zařízení, postup měření i dosaženou přesnost. Nejběžněji se hodnotí adheze ledu k hliníku, oceli, teflonu a jinými plasty. Jako klíčové parametry ovlivňující adhezi byly shledány teplota, drsnost povrchu, rychlost deformace. V závěru byly z prověřovaných studií vyneseny hodnoty adheze pro hliník a ocel. Pro teplotu $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ se naměřené hodnoty v různých studiích pohybují ve velkém rozpětí 100 až 1500 kPa.



obr. 2-25 a) rotační odstředivé zařízení pro testování adheze, b) výsledky měření [64]

Rønneberg a kol. [64] se ve své práci zabývali měřením adheze různých typů námrazy. Pro měření bylo použito rotační odstředivé zařízení, viz obr. 2-25 a). Na něm se napětí nutné k oddělení námrazy z povrchu vypočítává na základě znalosti dostředivého zrychlení a hmotnosti námrazy na rotoru. Odstředivá síla je pak určena z otáček rotoru, při kterých dojde k oddělení námrazy. Adheze námrazy byla měřena na povrchu hliníkového vzorku. Námraza byla na vzorky připravena zvláště v podobě zrnité námrazy a průsvitné námrazy. Poslední vzorek byl v podobě čistého ledu připravený pomocí gumové formy. Výsledky shrnuje obr. 2-25 b). V něm jsou vyneseny hodnoty adheze v závislosti na hustotě námrazy. V grafu představuje: Ice 1 - zrnitá námraza, Ice 2 - průsvitná námraza, Ice 3 - led.

Další měření adheze námrazy provedl Dou a kol. v článku [65] zabývající se mazací vrstvou na povrchu snižující adhezi ledu. Měření probíhalo push metodou. Tedy vytvoření ledového bloku na měřeném povrchu a následném stržení pomocí tečné síly, která byla měřena. Ze známé velikosti povrchu pokryté ledem je vypočteno smykové napětí. Jelikož dochází k rozdělení povrchů na rozhraní ledu a měřeném povrchu, lze toto maximální smykové napětí považovat za adhezi ledu k povrchu daného materiálu. Všechna měření probíhala při teplotě $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výsledky zobrazené na obr. 2-26 b) ukazují, že adheze ledu k mědi je přibližně 1 MPa. Autoři zde porovnávají tuto hodnotu s povrchem, na kterém bylo aplikováno speciální polymerní mazivo. To výrazně snižuje hodnotu adheze u všech povrchů a jak ukazuje obrázek obr. 2-26 a) tento povlak pak má i dlouhou životnost z hlediska počtu námrazových cyklů.



obr. 2-26 Měření adheze ledu k různým materiálům s čistým povrchem a při použití speciálního maziva [65]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Kontakt sběrače kolejového vozidla a trolejového drátu je důležitý systém, který zajišťuje napájení vozidla elektrickým proudem. Při jeho špatném fungování může dojít k zastavení vozidla. Na funkci tohoto systému má vliv několik faktorů, přičemž jedním z nich jsou environmentální podmínky jako námraza. Ta vzniká za příhodných hydrometeorologických podmínek na infrastruktuře drážních elektrorozvodných sítí, především pak na trolejovém drátu. Tento proces je nežádoucí, a proto se tomuto ději snažíme různými metodami předcházet. Jednou z těchto metod je chemická ochrana, kdy je na povrch trolejového drátu aplikována směs proti námraze. Pro správné fungování této metody je, kromě samotného systému nanášení, důležitý výběr vhodné kapaliny a její dávkování. Problém spočívá, že kapalina ovlivňuje námrazu v celé škále parametrů, ať už se jedná o její vznik, tak o její přilnavost k trolejovému drátu. Zároveň kapalina ovlivňuje i tribologické a elektrické vlastnosti kontaktu sběrače a troleje. Celkem se jedná i o desítky různých parametrů, které směs proti námraze ovlivňuje a lze je hůře či lépe hodnotit. Jelikož měřit veškeré veličiny by násobně přesáhlo obsah této práce, je pro práci zásadní identifikovat klíčové parametry, které umožní kapalinu porovnávat.

3.2 Analýza a zhodnocení rešerše

Provedená rešerše se zabývala metodami pro odstranění námrazy na trolejovém drátu a ochrany před ní. Dále byla řešena problematika styku sběrače a troleje. Kladen byl důraz na popis kontaktních těles a tribologického chování kontaktu. Směsím sloužícím pro boj s námrazou byla věnována samostatná kapitola, tak jako popisu vzniku námrazy a jejím typům. Poslední kapitola byla věnována zařízení, jež jsou používány pro zkoumání námrazy.

3.2.1 Tribologie kontaktu-sběrač trolej

Kontakt sběrače s trolejí lze charakterizovat jako otevřený, tribologický systém. Interagujícími tělesy jsou lišta smýkadla a trolejový drát. Lišty smýkadla jsou vyráběny nejčastěji z čistého uhlíku. Trolejový drát je tažen z čisté elektrotechnické mědi nebo její slitiny. Kontakt je zatížen normálovou silou vyvolanou přitlakem sběrače a dochází v něm k čistému skluzu. Statická hodnota této síly se pohybuje na intervalu 60 až 90 N [26, 27], při jízdě se tato hodnota kolísá a může dosáhnout i trojnásobku. Ke smýkání dochází díky dopřednému pohybu kolejového vozidla. Kromě tečné složky rychlosti ovlivňuje kontakt, také laterální. Ta vzniká vlivem cílené klikatosti trolejového drátu a tím dochází k rovnoměrnému opotřebení smýkadla sběrače.

Pro popis chování tohoto kontaktu se používá především součinitel tření. Tato důležitá veličina popisující každý tribologický systém zde kromě obvyklých parametrů jako teplota a rychlost, ovlivňuje i elektrický proud procházející kontaktem. V závislosti na vnějších vlivech, a především na materiálové dvojici se tato hodnota může pohybovat v intervalu mezi 0,1 až 0,4 [31, 32, 35–37]. Další velmi často měřenou veličinou u tohoto kontaktu je opotřebení. Všechny vlivy, které ovlivňují kontakt sběrače a troleje jsou v diagramu na obr. 3-1.



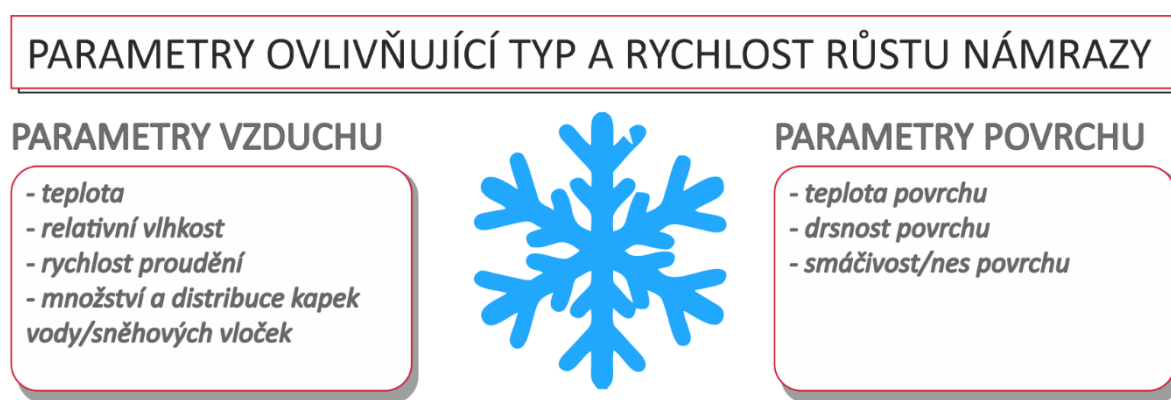
obr. 3-1 Otevřený tribologický systém popisující kontakt sběrač-trolej

Ke zkoumání tribologie kontaktu sběrač-trolej mohou sloužit jednoúčelová testovací zařízení. Ty nahrazují dopředný pohyb vozidla, respektive sběrače, pohybem troleje, jako například [34]. To je řešeno pomocí nekonečného drátu umístěného na rotujícím kotouči jako v případě, nebo pomocí translačního pohybu přímého vzorku troleje, tak jako [31, 32]. K pohybující troleji je pak přitlačován vzorek simulující smýkadlo sběrače. Další zařízení pak používají pro testy konfiguraci pin-on-disk [35–37]. Kromě pohybu vzorku smýkadla pro zajištění přitlaku, jsou často zařízení vybavena systém umožňující laterální pohyb vzorku vůči troleji. Tím je zajištěno větší připodobnění skutečnému kontaktu a zároveň dochází k rovnoměrnému opotřebení smýkadla. Všechny zkoumané zařízení v rešerši slouží především k výzkumu materiálů ve vztahu k jejich opotřebení.

V rámci rešerše nebylo nalezeno zařízení, které by sloužilo ke zkoumání chování kontaktu sběrače a troleji při působení námrazy.

3.2.2 Termodynamický systém vzniku námrazy

Námraza v technické praxi označení pro námrazové jevy, což je atmosférický jev spojený s depozicí vody na povrchy těles a jeho přeměnu do pevného skupenství [53, 54]. Spolu s ledovkou a lepkavým sněhem tvoří kategorii hydrometeorů námrazky. Ty jsou svým vznikem spojovány s nebezpečí v podobě materiálních škod na majetku a přírodě. Přechod mezi jednotlivými typy námrazových jevů není výrazný, což sťažuje jejich rozpoznávání. Z hlediska této práce je nejnebezpečnější typ námrazků ledovka, případně i průsvitná námraza, protože dosahují největších přírůstků v čase a také mají vysokou přilnavost a soudržnost [53, 56]. Z hlediska tvorby námrazových jevů rozeznáváme celkem tři mechanismy vzniku: desublimací vzdušné vlhkosti, mrznutí dopadajících kapek vody deště nebo mlhy, a lpěním vloček mokrého sněhu na povrchu. Důležité parametry ovlivňující vznik námrazových jevů jsou znázorněny v diagramu obr. 3-2.



obr. 3-2 Vlivy ovlivňující vznik a rychlost růstu námrazových jevů

Pro zkoumání námrazy se používají testovací zařízení v podobě klimatických komor. Jedná se o zařízení často s nucenou cirkulací vzduchu s podobou větrných tunelů. Důležitým prvkem těchto zařízení je přívod vody do systému. To je nezbytné, protože z pouhé vzdušné vlhkosti vzduchu by nárůst námrazy byl nízký. Rozprašování vody do proudu vzduchu využívají zařízení [21, 62], takto lze na trolejovém drátu dosáhnout kombinace ledovky a průsvitné námrazy. Další možností zařízení popsané v [61] jde o rozprašování drčeného přírodního sněhu do proudu vzduchu o teplotě blízké nule. Takto lze na trolejovém drátu vytvořit vrstvu mokrého sněhu. Dle knihy [56] a testování na zařízení popsaném v [21] by pro dosažení dvou různých typů námrazy zapotřebí regulovat rychlost proudění do přibližně 6 m/s. Dle tabulky tab. 2-5 popisující námrazové jevy by měla mít klimatická komora možnost regulace teploty do $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Měřenými parametry je pak hmotnost vzniklé námrazy, tak jako v případě prací [21, 63], nebo objem vzniklé námrazy určeno pomocí tloušťky vrstvy na povrchu drátu dle [61].

3.2.3 Směsi proti námraze

Jedná se o roztoky někdy s přísadou pevných přísad. Jejich základem je alkohol, případně směs olejů v rámci jedné výjimky v podobě Interflonu Lube EPR. Směsi na alkoholové bázi jsou míchány nejčastěji z propylenglykolu. Kromě něj se pro tuto aplikaci používá i glycerol. Použití etylenglykolu k tomuto účelu bylo nalezeno pouze v rámci experimentálních prací [3, 21]. To je zřejmě způsobeno jeho vysokou toxicitou. Principem funkce těchto směsí je aplikace na povrch trolejového drátu skrze speciální nanášecí zařízení. Díky nízké teplotě tání těchto směsí kolem $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, v závislosti na ředění vodou, by nemělo na povrchu troleje docházet ke vzniku námrazy. Pro lepší lpění na povrchu drátu jsou do směsí přidávány zahušťovadla pro zvýšení viskozity, případně další přísady. Ty mění chování na pseudoklasické, což by jim mělo propůjčovat lepší přilnavost na troleji. U téměř všech směsí je doba výdrže na trolejovém drátu udávána v řádu 1 až 3 dny. Pouze u Interflonu Lube EPR je délka ochrany trolejového drátu uváděná 30 až 60 dní. To může být způsobeno mimo jiné nemísitelností této směsi s vodou, jako jediné z popisovaných směsí. Parametry všech směsí proti námraze používaných v kolejové dopravě a kterými se zabývala řešerše jsou uvedeny v obr. 3-3.

Název	Výrobce	Základová kapalina	Hustota	Viskozita	Teplota tuhnutí (objemová koncentrace)	pH	Príměsy	Ředitelnost vodou	Výdrž	Aplikace	Dávkování	Systém užívaný k nanášení	Výrobce systému	Biodegradabilita
Profil Pro	Strub	Propylenglykol	[kg/m ³] [mm ² /s]	50 - 70 (40 °C)	-56 °C (100 %) -30 °C (50 %) -12 °C (33 %)	8 - 9	inhibitory koroze	A	5 - 7 dní	kontaktně, bezkontaktně	1,3 l/km (50 km/h)	Profil 1500V	Kummler+Watter	100 %
Pantotec DK	Igralub	Propylenglykol	1040	55 - 65 (40 °C)	-30 °C (50 %) -12 °C (33 %)	8 - 9	inhibitory koroze	A	několik dní	bezkontaktně	0,02 l/km (20 km/h)	Bez názvu	Igralub	> 80 %
Kilfroost Rail	* Kilfroost	Propylenglykol	1040	164 (20 °C)	< -25 °C (100 %)	7	inhibitory koroze, zahušťovadla	A	?	kontaktně, bezkontaktně	-	-	-	> 99 %
Kilfroost Rail Plus ^{*, +}	Kilfroost	Propylenglykol	1038	271 (20 °C)	< -25 °C (100 %)	7	inhibitory koroze, zahušťovadla	A	12 h při -5 °C	kontaktně, bezkontaktně	-	-	-	> 99 %
Lube EPR	Interflon	Směs minerálních a rostlinných olejů	850	21,5 (40 °C)	-45 °C (100 %)	?	rozpuštědla, částice teflonu, odebňovadla	N	30 až 60 dní (FroStop)	kontaktně, bezkontaktně	1 l/km (30 km/h)	FroStop, IceGuard	Strukon, Dipsa	95 %
Fridex Eko	Velvana	Propylenglykol	1055	52 (20 °C)	-60 °C (100 %) -30 °C (50 %) -15 °C (33 %)	8	inhibitory koroze, stabilizátor, odebňovadlo	A	1 - 2 dny	bezkontaktně	?	"Silintac"	DPMB	?
		Glycerol	1212	1121 (20 °C)	18 °C (100 %) -23 °C (50 %) -9 °C (33 %)	7	-	A	2 - 3 dny	bezkontaktně	0,2 l/km (30 km/h)	Non-icing-System (NIS)	Stemmann-technik	100 %
Zero Gravity	* Midwest	Propylenglykol, Diethylenglykol	1060	150 - 250 (20 °C)	< -30 °C (100 %)	7 - 9	inhibitory koroze, zahušťovadla	A	?	bezkontaktně	?	Ice-Slicer	Midwest	> 90 %

* Kapalina určená především pro aplikace v systémech napájení třetí kolejniční

+ Kapalina má pseudoplastické chování a je odvozena od protínárazových kapalin IV. typu užívaných v letectví

obr. 3-3 Tabulka směsí proti námraze používaných v kolejové dopravě

3.3 Cíl práce

U vybraných směsí provést experimenty hodnotící jejich účinky na ochranu před námrazou. Výsledky těchto testů budou porovnávány se složením těchto směsí. Míra ochrany před námrazou bude hodnocena porovnáním hmotnostního přírůstku námrazy. Dále bude u směsí měřen jejich vliv na adhezi námrazy k trolejovému drátu. Tyto testy budou doplněny o další měření, jež by měla otestovat vliv směsí na tribologii kontaktu sběrače a troleje.

Na základě naměřených dat a znalosti složení směsí bude určeno vhodné dávkování těchto směsí na povrch trolejového drátu a určen vliv jejich složek na měřené veličiny.

Díličními cíle diplomové práce:

- Rešerše poznatků ohledně směsí proti tvorbě námrazy
- Návrh metodiky hodnocení směsí proti námraze
 - hodnocení míry ochrany směsí před vznikem námrazy
 - hodnocení směsí na základě výdrže ochrany před vznikem námrazy
 - hodnocení vlivu směsí na základě jejich vlivu na adhezi námrazy
- Návrh a výroba experimentálního zařízení pro tvorbu námrazy
- Měření kontaktního úhlu směsí na povrchu mědi

Diplomová práce je řešena v rámci projektu Technologické agentury České republiky TH04010034, jehož cílem je vývoj prediktivního systému ochrany trolejového vedení proti extrémním klimatickým podmínkám. Tato práce by měla pro řešitele projektu firmu *TRIBOTEC, spol. s r.o.* znamenat výběr vhodné směsí proti námraze, a také množství a intervaly jejího dávkování.

Předpokládaný výstup diplomové práce bude mít dvě podoby, jež shrnuje tab. 3-1.

tab. 3-1 Charakteristiky výstupů práce

Zkratka	Publikační výsledek
J	článek v odborném periodiku
G _{fuk}	funkční vzorek (testovací zařízení)

Vědecké otázky:

1. *„Jaký bude vliv příměsí v komerčně dostupných směsích oproti směsi samotného alkoholu s vodou o stejné koncentraci?“*
2. *„Jaký bude vliv směsi proti námraze na adhezi námrazy k trolejovému drátu?“*
3. *„Jakým způsobem bude protinámrazová směs ovlivňovat tribologické parametry kontaktu troleje se sběračem?“*

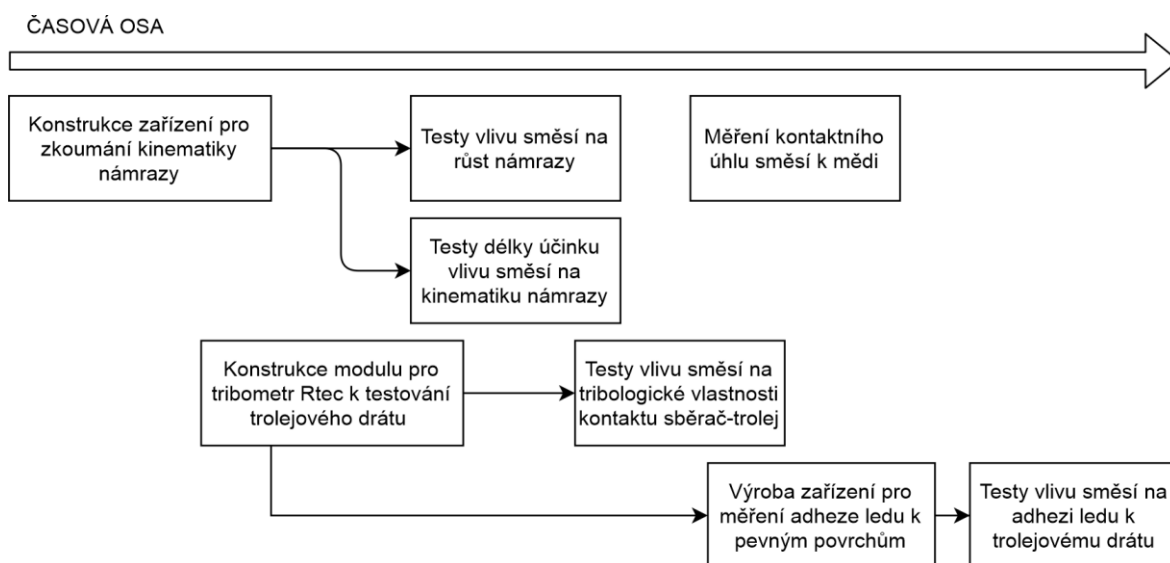
Pracovní hypotéza:

1. *„Předpokládáme, že zabránění vzniku námrazy, je způsobeno výhradně přítomností alkoholu. Pokud tedy mají identickou koncentraci stejného alkoholu, měly by působit proti vzniku námrazy stejně.“*
2. *„Předpokládá se, že z povrchu trolejového drátu s protinámrazovou směsí půjde námraza odstranit snadněji.“*
3. *„Je předpokládáno, že kapalina v kontaktu povede ke snížení součinitele tření a velikosti opotřebení stykových ploch, protože dojde ke smíšenému režimu mazání kontaktu.“*

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Postup řešení

1. Výběr vhodné metodologie měření
 - a. Hodnocení směsí vzhledem jejich ochrany před vznikem námrazy
 - b. Hodnocení délky účinku této ochrany
 - c. Hodnocení vlivu směsí na adhezi námrazy k trolejovému drátu
 - d. Hodnocení vlivu směsí na tribologické vlastnosti kontaktu sběrač-trolej
2. Návrh a výroba testovacího zařízení
 - a. Na základě zvolené metodologie měření zvolit koncepci zařízení
 - b. Návrh zařízení z hlediska klíčových komponent (chlazení, ventilace, měřidla)
 - c. Konstrukce zařízení, vytvoření kalkulace nákladů
 - d. Výroba zařízení
 - e. Zkušební ověření funkce zařízení
 - f. Návrh a výroba modulu tribometru Rtec pro tribologické testy
3. Měření
 - a. Výběr směsí proti námraze pro testování
 - b. Testování vlivu protinámrazových směsí na růst námrazy
 - c. Testování tribologických vlastností kontaktu sběrač-trolej
 - d. Měření adheze námrazy k trolejovému drátu
 - e. Měření kontaktního úhlu směsí k mědi



obr. 4-1 Diagram znázorňující postup práce

4.2 Materiál

4.2.1 Směsi proti námraze



obr. 4-2 Směsi použité pro testy v rámci této práce, zleva: Lube EPR, Fidex G+, DF Plus, Antifreeze, Fridex Eko, Propylenglykol 50 %, Glycerol 50 %, Glycerol 83 %

Pro potřeby této práce byly získány některé kapaliny popisované v rešerši. Ty byly doplněny o další s podobným složením. Z kapalin zmíněných přímo v rešerši je to Lube EPR od Interflonu, který jako jediný není založen na některém z alkoholů. Dále je užitá směs čistého glycerolu s vodou a koncentrací 83 %, kterou používá systém NIS od Stemmann-technik. Pro porovnání bude také testována směs glycerolu s nižší koncentrací 50 %, která vykazuje dokonce nižší teplotu tání. Kapalina založená na propylenglykolu Fridex Eko byla také zmíněna v rešerši, pro použití v rámci této práce je ředěna na 50 %. To je hodnota doporučená výrobcem. Další zástupcem kapalin na bázi propylenglykolu je Antifreeze od Star Brite, což je běžně dostupná nemrzoucí směs pro domácí použití. Má poměrně nízkou koncentraci alkoholu a s tím související vyšší hodnotu teploty tání. DF Plus od společnosti Kilfrost je protinámrazovou kapalinou I. typu užívanou v letectví. Pro zkoumání vlivu přísad je také použito čistého roztoku propylenglykolu s vodou o koncentraci 50 %. Poslední testovaná kapalina je Fridex G+, zakoupena již jako naředěná. Je to jediná kapalina z výčtu založená na etylenglykolu. Ačkoli je tento alkohol pro člověka značně jedovatý používá se v některých protinámrazových kapalinách v letectví a také byl zmíněn a testován v některých článcích [3, 45]. Všechny kapaliny a jejich vlastnosti jsou uvedeny v tab. 4-1.

tab. 4-1 Tabulka směsí použitých k testování v této práci, cena směsí je počítána ve zředěném stavu

Název	Výrobce	Základová kapalina	Obsah alkoholu	Teplota tání [°C]	Hustota [kg/m ³]	Viskozita [mm ² /s]	Cena [Kč/l]
Glycerol 83 %	Penta	Glycerol	83 %	-18 °C	1215	70,3 (20 °C)	66
Glycerol 50 %	Penta	Glycerol	50 %	-23 °C	1129	5,4 (20 °C)	39
Propylenglykol 50 %	Penta	Propylenglykol	50 %	-33 °C	1016	4,4 (20 °C)	65
Fridex Eko	Velvana	Propylenglykol	> 45 %	-30 °C	1048	11 (20 °C)	67
Star Brite Antifreeze	Star Brite	Propylenglykol	10 – 30 %	-11 °C	1047	1 (20 °C)	132
Kilfrost DF Plus	Kilfrost	Propylenglykol	> 80 %	-70 °C	1045	23,9 (20 °C)	163
Fridex G+	Velvana	Etylenglykol	40 – 50 %	-30 °C	1066	3,6 (20 °C)	80
Interflon Lube EPR	Inderflon	Směs olejů	0 %	-45 °C	850	21,5 (40 °C)	1307

4.2.2 Trolejový drát

Pro potřeby testů s kinematikou námrazy, byl použit nový trolejový drát s průřezem typu AC-120 vyrobený z materiálu CuAg_{0,1} dle ČSN EN 50149. Jeho nominální průřez je 120 mm², přičemž byl řezán na délku 122 mm. Vzorky trolejového drátu byly mechanicky zbaveny prachu a nečistot v ultrazvukové čističce a následně chemicky očištěny pomocí acetonu. U jednoho vzorku byla měřena drsnost povrchu na kontaktní ploše. Pomocí profilometru Bruker Contour GT X8 byla naměřena hodnota drsnosti povrchu Ra = 0,35 μm. Celkem bylo pro potřeby práce vyrobeno devět vzorků trolejového drátu. Všechny vzorky byly váženy a očíslovány na místě řezu viz obr. 4-3 a). Pro zhodnocení makrostruktury povrchu byl vzorek snímán na kontaktní ploše pomocí digitálního mikroskopu Keyence VHX-6000 viz obr. 4-3 b). Z něj je patrný hladký povrch místy vyplněný mělkými rýhami, které byly zřejmě způsobeny technologií výroby.

Pro tribologické testy, kde je modelováno opotřebení profilu je trolejový drát nahrazen měděným taženým profilem. Jedná se plochou tyč 40 x 5 mm délky 65 mm vyrobenou z elektrovodné mědi Cu 99,9 E dle ČSN 42 3001, což je stejný materiál, ze kterého se vyrábějí i trolejové dráty. Jako skluzová plocha je použita kratší strana tohoto profilu. Povrch profilu byl broušen smirkovým papírem o zrnitosti 600 a 1200, tak aby u něj bylo dosaženo drsnosti povrchu Ra = 0,38 μm. Tedy ekvivalentní drsnosti povrchu trolejového drátu. Následně byl vzorek čištěn pomocí ultrazvukové čističky a acetonem.

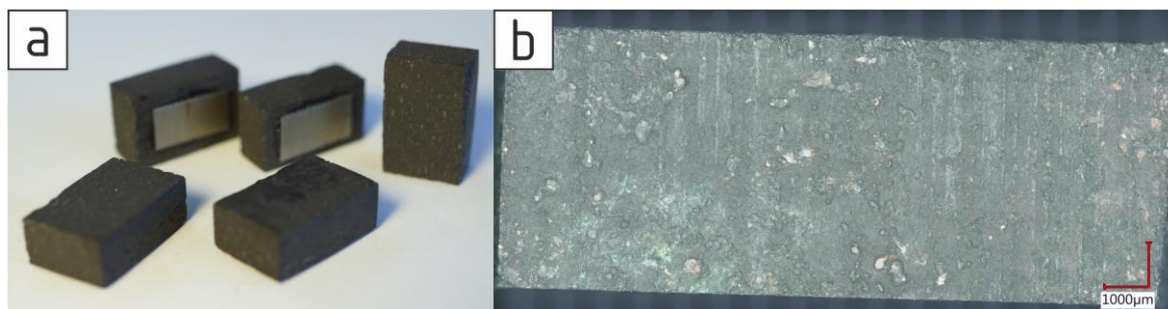


obr. 4-3 a) vzorky trolejového drátu, b) snímek povrchu troleje digitálního mikroskopu Keyence VHX-6000

4.2.3 Náhrada smýkadla sběrače

K tribologickým testům je jako člen nahrazující sběrač použito fragmentu uhlíkové lišty smýkadla. Ta byla získána jako vyřazená od brněnského dopravního podniku, který ji využíval na tramvaji. Z ní byl nejdříve vyříznut vzorek, tak aby původní opotřebovaná třecí plocha byla zachována. Tato plocha byla také skenována digitálním mikroskopem viz obr. 4-4 b). Na něm je patrné především opotřebení vzniklé erozí vlivem elektrického oblouku. Toto opotřebení je ve formě prohlubní. Dále jsou patrné stopy mědi ve formě zrn, které povrch kontaminovaly zřejmě kvůli adhezivnímu tečení materiálu. Na profilometru byla určena drsnost povrchu Ra = 25 μm.

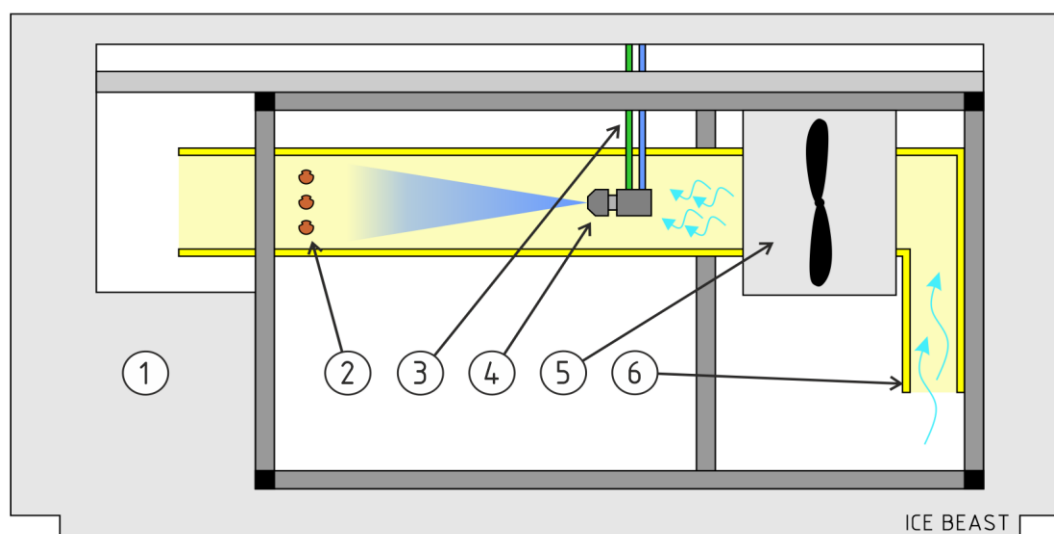
Vzhledem k členitosti a morfologii povrchu by nebylo možné dosáhnout pro každý test identického vzorku. Proto vzorky pro testy mají třecí plochu zbroušenou do jedolité vrstvy původního uhlíku. Vzorky byly také čištěny pomocí acetonu. Tato plocha pak dosahuje drsnosti povrchu přibližně $R_a = 5 \mu\text{m}$. Pro potřeby měření bylo vyrobeno celkem pět kvádrů o velikosti $14 \times 10 \times 6 \text{ mm}$, viz obr. 4-4 a). Ty byly navíc na jedné straně doplněny kovovými plíšky. Jejich účelem bylo zabránění poškození uhlíku aretačním šroubem, pomocí kterého se vzorky do tribometru upínaly.



obr. 4-4 a) uhlíkové fragmenty smýkadla sběrače ve formě bloků pro tribologické testy, b) povrch opotřebované lišty třecí plochy sběrače

4.2.4 Zařízení pro studium kinematiky námrazy

Pro potřeby studování kinematiky námrazy bylo v rámci této práce nevrženo a vyrobeno experimentální zařízení. Jeho konstrukci je věnována kapitola v rámci výsledků práce. Jedná se o zařízení s uzavřeným nuceným oběhem vzduchu pomocí ventilátoru. To je celé umístěno v mrazničce, viz schéma na obr. 4-5. Do proudu vzduchu je za ventilátorem rozprašována voda pomocí dvoumédiové trysky. Směs vzduchu s kapičkami vody prochází testovací sekci se třemi vzorky trolejového drátu o průřezu 120 mm^2 a délce 122 mm umístěných příčně na proud vzduchu.

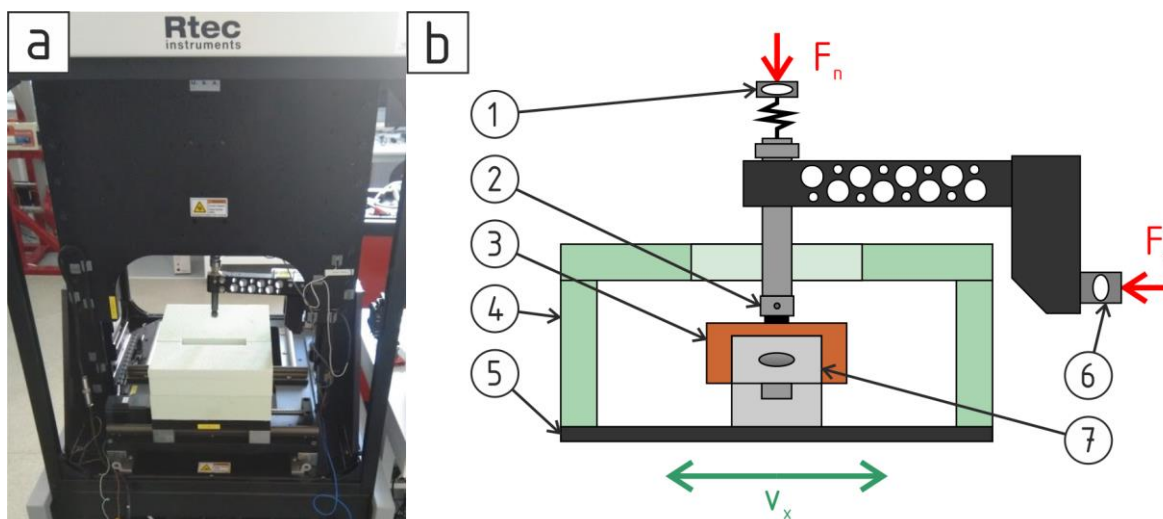


obr. 4-5 Schéma zařízení pro studium kinematiky námrazy, 1 – chladič zařízení, 2 – vzorky trolejového drátu, 3 – přívod vody a vzduchu, 4 – tryska, 5 – ventilátor, 6 – sání vzduchu

Zařízení umožňuje tvorbu všech typů námrazových jevů na povrchu vzorků. Rychlost růstu námrazy lze regulovat především pomocí tlaku vzduchu v trysce a tlaku přiváděné vody. Zároveň je možné regulovat rychlost proudění v rozsahu 3 až 6 m/s. Regulace teploty probíhá bez zpětné vazby mechanickým nastavením kompresoru mrazničky a lze ji regulovat přibližně od -7 do -20 °C. Pro měření hmotnosti byla použita váha MyWeigh iBalance iM01 s přesností 0,01 g a rozsahem 1 kg.

4.2.5 Zařízení pro studium tribologických vlastností kapalin

Pro hodnocení vlivu kapalin na tribologii kontaktu sběrač-trolej bylo užito profesionálního tribometru Rtec Instruments MFT [66] zobrazeného na obr. 4-6 a). Jedná se o univerzální portálový tribometr s posuvným stolem v ose XY, přičemž pohyblivá je i vertikální osa Z obsahující silový snímač. Dále lze měřit kyvným ramenem třecí sílu v ose X. Takto lze na tribometru vyhodnocovat součinitel tření. Výhodou je možnost automatického korigování síly v ose Z na základě přednastavené hodnoty. Zařízení má k dispozici dva páry snímačů. První, s vyšším rozsahem každý o velikosti 1 kN, druhý pár má nižší rozsah 60 N pro osu X a 120 N pro osu Y. Na základě použití doplňkových modulů instalovaných na pohyblivý stůl, lze měřit v různých konfiguracích. Na Ústavu konstruování jsou k dispozici moduly pro měření v konfiguracích: block on ring, ball on disk, pin on disk. Případně lze měřený vzorek upínat přímo na posuvný stůl a ten použít k vykování translačních pohybů. Takto lze na zařízení provádět scratch testy nebo i měřit tvrdost.

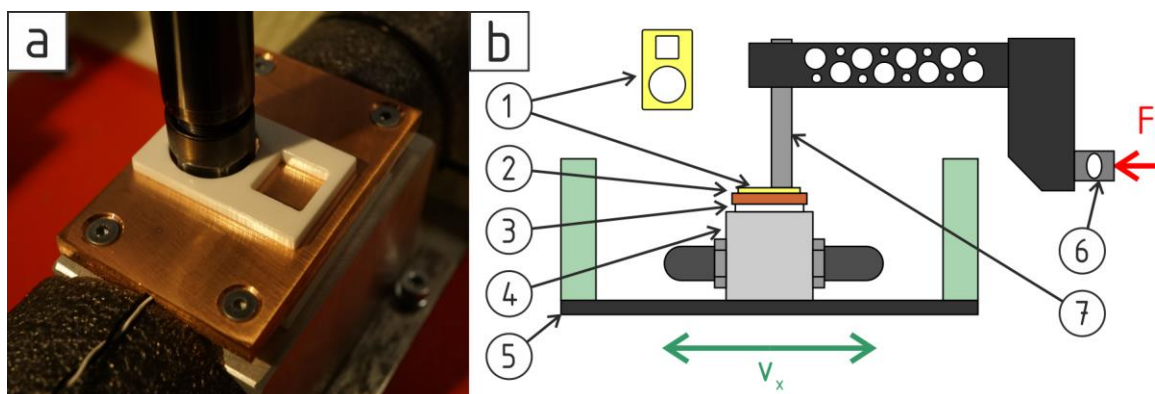


obr. 4-6 a) univerzální tribometr Rtec s klimatickou komorou, b) schéma měřící aparatury 1 – snímač normálové síly, 2 – upínadlo třecího elementu uhlíku, 3 – vzorek náhrady trolejového drátu, 4 – vnější tepelná izolace komory, 5 – podstava přišroubovaná na posuvný stůl tribometru XY, 6 – snímač třecí síly, 7 – přesný svěrák pro upínání vzorku trolejového drátu

Pro potřeby této práce byl vytvořen modul, který umožňuje konání experimentů s trolejovým drátem, viz obr. 4-6. Mimo to lze měření také provádět s měděnou destičkou jako opotřeбенý ekvivalent profilu trolejového drátu. Konstrukci tohoto modulu je věnována Příloha 2.

4.2.6 Zařízení pro studium adheze námrazy

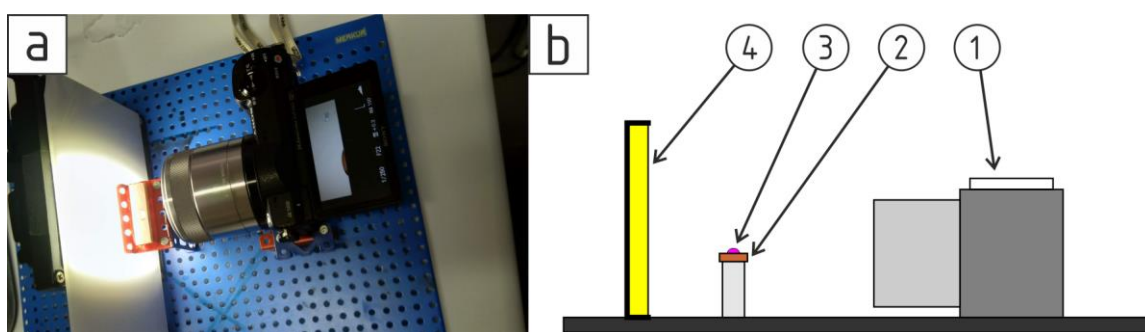
Pro hodnocení adheze rozhraní ledu a mědi bylo použito univerzálního tribometru Rtec doplněného o modul pro tvorbu ledu na vzorku mědi, viz obr. 4-7 a). Tento modul byl navrhnout a sestaven v rámci této práce a jeho schéma je na obr. 4-7 b). Detailnější popis je uveden v Příloze 2. Zařízení využívá jako upínací desku (5) modul pro měření tribologie kontaktu sběrač-trolej. Ten je konstruován jako tepelně izolovaný od zbytku tribometru. Do něj je upnut tepelný výměník (4). Ten slouží k chlazení Peltierova článku (3). Jeho studená strana pak chladí měděnou destičku (2) o rozměrech 40 x 60 mm a tloušťce 5 mm. Díky vysokému chladicímu výkonu článku až 60 W, lze destičku velice rychle podchladiť až na teplotu $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. To však vyžaduje intenzivní chlazení článku pomocí tepelného výměníku a termoregulační jednotky Haake DC50-K41 [67]. Ta pomocí olejové náplně a oběhového čerpadla udržuje teplotu výměníku až na teplotě $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na měděnou destičku se přikládá forma pro tvorbu ledového kvádru (1) vyrobená z PMMA. Ledový kvádr je následně utržen z povrchu pomocí ramene s tenzometrem (7) díky posuvu stolu tribometru v ose X.



obr. 4-7 Modul pro tribometr Rtec sloužící k zkoumání adheze námrazy, a) detail na vzorek měřeného materiálu (měděná destička), b) schéma modulu 1 – forma pro tvorbu ledu, 2 – vzorek měřeného materiálu, 3 – Peltierův článek, 4 – blok tepelného výměníku pro chlazení, 5 – podstava přišroubovaná na posuvný stůl tribometru XY, 6 – snímač tečné síly, 7 – kyvné rameno

4.2.7 Zařízení pro měření kontaktního úhlu

Pro vyhodnocování velikosti kontaktního úhlu rozhraní kapalina-trolejový drát byla využita jednoduchá aparatura, viz schéma na obr. 4-8 b). Skládá se z fotoaparátu (1) vybaveného makro objektivem s poměrem zvětšení až 1:1, ohniskovou vzdáleností 30 mm a snímačem typu APS-C. Pomocí něj je fotografována kapka (3) umístěná na vzorku trolejového drátu (2) ve vzdálenost 80 mm. Jako pozadí slouží LED reflektor opatřený polopropustným světelným difuzorem (4). Vzorek trolejového drátu byl vyroben z materiálu CuAg0,1. Trolejový drát nemá žádnou rovinnou plochu, bylo nezbytné ji vytvořit. Rovinná plocha byla následně broušena, dále čištěna v ultrazvukové čističce a také pomocí acetonu. Na této ploše pak byla naměřena drsnost $R_a = 0,18 \mu\text{m}$. Nižší hodnota drsnosti než na skutečném trolejovém drátu je spíše výhodou, protože měření není tolik drsností ovlivňováno.

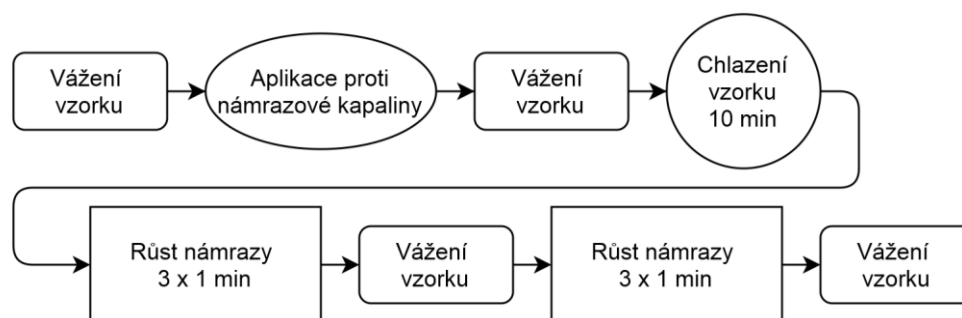


obr. 4-8 Aparatura pro měření kontaktního úhlu, a) fotografie aparatury, b) schéma aparatury, 1 – fotoaparát, 2 – Cu trolej, 3 – měřená kapalina, 4 – led reflektor

4.3 Postup měření

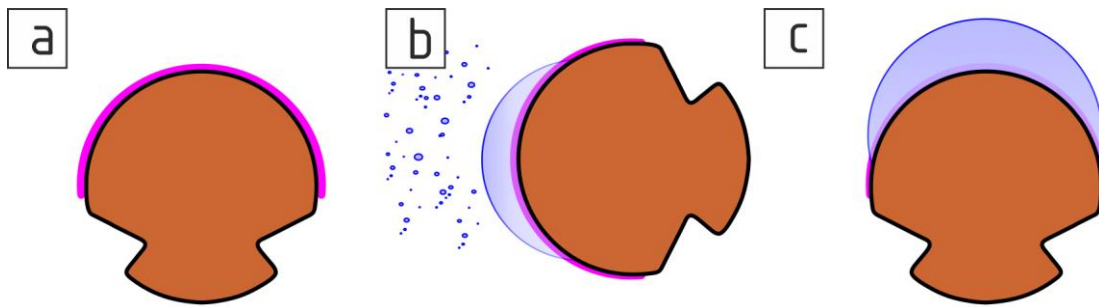
4.3.1 Hodnocení vlivu kapalin na kinematiku námrazy

V rámci tohoto experimentu byl zkoumán přímý vliv směsi na rychlost tvorby námrazy na trolejovém drátu. Všechny osm testovaných směsí a vzorky trolejového drátu byly popsány v předchozí části. Test spočíval v aplikaci směsi proti námraze na trolejový drát a následném měření hmotnostního přírůstku námrazy. Celé měření lze popsat pomocí diagramu na obr. 4-9. Celkem byly provedeny tři testy každé směsi pro statistické zpracování. Z ověřovacích experimentů testovacího zařízení vyplynulo, že rychlost růstu námrazy je v rámci jednoho testu na všech třech vzorcích velice podobná. Nicméně při opakování experimentu docházelo ke značným rozdílům. To je dáno velkými množstvími proměnných, které mají na kinematiku růstu námrazy vliv. Protože do testovacího zařízení lze naráz umístit pouze tři vzorky trolejového drátu, nebylo možné provést test všech směsí současně za totožných podmínek. Z tohoto důvodu byly testy prováděny způsobem porovnávání hmotnosti námrazy vzorku se směsí a referenčního vzorku bez. Takto byl test prováděn vždy pro dvě testované směsi a jeden referenční vzorek.



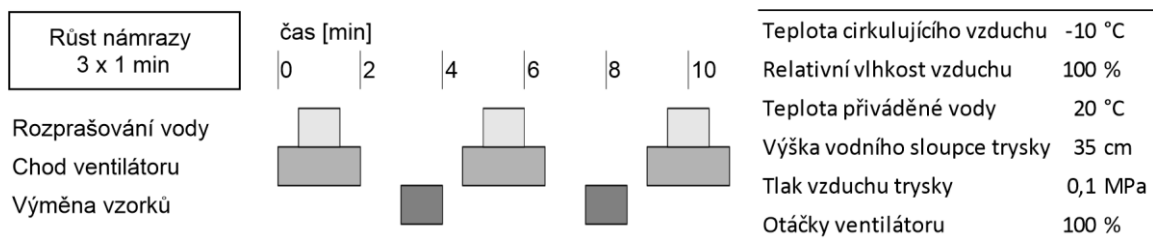
obr. 4-9 Diagram postupu měření vlivu kapalin na kinematiku námrazy

Na zvážený trolejový drát zbavený zbytků námrazy po předchozím měření a očištěný pomocí acetonu je aplikována protinámrazová směs. Ta je aplikována kontaktně pomocí štětce na spodní plochu trolejového drátu. Nicméně profil troleje je pro snadnější nanášení otočen vzhůru, viz obr. 4-10 a). Při nanášení byla snaha dosáhnout co největšího množství nanesené směsi. Kapalína mimo tuto plochu byla případně setřena. Takovýto vzorek byl následně vážen pro určení množství aplikované směsi. Následně byly vzorky umístěny v zařízení pro studium námrazy, kde se deset minut ochlazovaly. Tato doba byla určena na základě měření vývoje teploty vzorků bezkontaktním teploměrem. A sledována jako dostatečná pro dosažení teploty vzorku troleje jako okolního chladného vzduchu.



obr. 4-10 a) místo aplikace protinámrazové směsi na trolejový drát (fialová barva), b) poloha trolejového drátu v zařízení, c) poloha při vážení vzorku s námrazou

Po ochlazení byly vzorky vystaveny námrazovému cyklu viz diagram obr. 4-11. Pomocí tohoto námrazového cyklu lze dosáhnout zrnité námrazy, která vykazuje poměrně velkou tvrdost a nelze ji otěrem poškodit. Během tohoto námrazového cyklu je do větrného tunelu se vzorky voda rozprašována celkově jen 3 x 1 min. Ačkoli celková doba setrvání vzorků v zařízení je vyšší. Výměna vzorků probíhá v klimatickém tunelu zařízení, tak aby byl eliminován vliv polohy vzorku. Díky dvěma výměnám se vzorky vystřídají na všech pozicích v klimatickém tunelu. Po skončení jsou vzorky opět váženy a celý cyklus se opakuje. Tímto způsobem jsou z každého experimentu pro každý vzorek zaznamenány dvě hmotnosti námrazy a také hmotnost protinámrazové kapaliny.

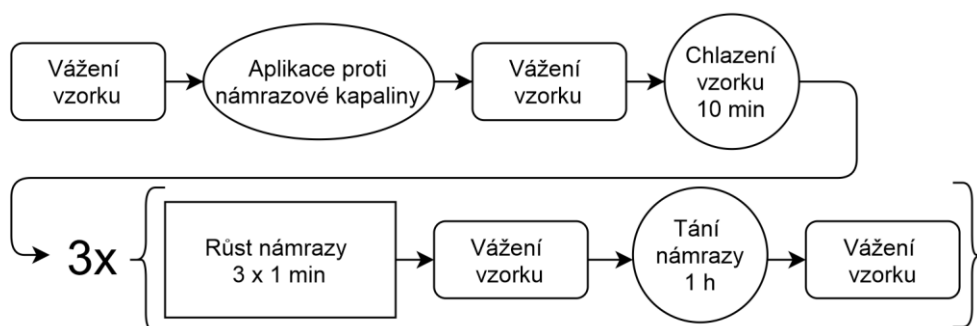


obr. 4-11 Diagram průběhu námrazového cyklu 3 x 1 min a experimentální podmínky

Jedna sada experimentů pro všechny kapaliny byla provedena během jednoho dne. Nejdříve byly vždy měřeny tři vzorky bez protinámrazové kapaliny pro ustálení podmínek v námrazovém zařízení a ověření rovnoměrnosti růstu námrazy na vzorcích. Následně byly provedeny čtyři testy, vždy po dvou protinámrazových směsích. Po skončení experimentů bylo celé zařízení z mrazničky vyjmuta a odmrazováno. Důvodem bylo množství námrazy na stěnách tunelu, ale i na lopatkách ventilátoru.

4.3.2 Hodnocení délky účinku vlivu směsí na kinematiku námrazy

Cílem těchto experimentů bylo zhodnocení, jak dlouho bude protinámrazová směs účinkovat v ochraně trolejového drátu před vznikem námrazy. Průběh experimentu a jeho vyhodnocování bylo v mnohém podobné předchozímu testu vlivu směsí na rychlost růstu námrazy. Zjednodušeně se bude jednat o tři předchozí testy za sebou, přičemž mezi testy se námraza nechá roztát. Diagram znázorňující postup měření je na obr. 4-12. Hlavním rozdílem je, že délka růstu námrazy je zde pouze 3 min. Jelikož byly pro měření k dispozici celkem tři sady vzorků trolejového drátu, bylo časově možné provádět vždy tři experimenty současně. To znamená, že v čase tání námrazy zbylých dvou sad, byly prováděny testy na třetí. Testovány však byly vždy čtyři směsi ve dvou sadách vzorků a jedna sada bez protinámrazových směsí. Tou se také vždy začínalo, pro ustálení podmínek v testovacím zařízení a pro sledování případných výrazných odchylek v rychlosti růstu námrazy. Po provedení těchto třech experimentů bylo testovací zařízení odmrazováno.



obr. 4-12 Diagram znázorňující postup měření délky účinku vlivu směsí na kinematiku námrazy

Příprava vzorků, nanášení protinámrazové směsi a vážení probíhalo identicky jako v předchozím měření. Tání námrazy probíhalo v poloze, kdy námraza směřovala dolů. Jedna hodina byla zvolena jako čas, kdy dojde k roztání námrazy a odpaření většiny vzniklé kapaliny na povrchu. Předpoklad byl, že protinámrazová směs se zkapalněnou námrazou zředí, případně se i část společně se vzniklou vodou vyplaví. Během jednoho opakování experimentu byly vzorky s námrazou fotografovány pro vizuální hodnocení růstu námrazy.

4.3.3 Hodnocení vlivu směsí na tribologické vlastnosti kontaktu

Cílem těchto experimentů bylo analyzovat, jaký vliv budou mít směsi proti námraze na chování kontaktu sběrače a troleje. Experimenty byly prováděny na tribometru Rtec, přičemž měřenými veličinami byly zejména součinitel tření, opotřebením trolejového drátu, jeho drsnost a pak také drsnost opotřebeného uhlíku. Pro určení experimentálních podmínek simulující skutečný kontakt bylo nutné určit normálové zatížení kontaktu realizované skrze uhlík. Tato hodnota byla zvolena na základě zachování ekvivalentního tlaku v kontaktu. Nejdříve je však nutné určit tlak v reálném kontaktu sběrač-trolej.

Analýza reálného kontaktu sběrač trolej

V případě uvažování nového trolejového drátu a neopotřebovaného smýkadla, lze na kontakt nahlížet jako na styk válce s rovinou. Pro určení kontaktního tlaku můžeme tedy použít Hertzovy kontaktní teorie. Jako hodnotu normálové síly použijeme 80 N vycházející ze směrnice T24 [26] brněnského dopravního podniku. Šířka lišty smýkadla, které dopravní podnik používá, je 60 mm. Na každém sběrači jsou však lišty dvě. Pokud budeme uvažovat vodič o průřezu 120 mm² je jeho průměr 13,2 mm. Materiálové vlastnosti pro čistou elektrotechnickou měď jsou všeobecně známy a pro výpočet bylo použito modulu pružnosti 125 GPa a poissonovy konstanty 0,35. Pro uhlík byly použity hodnoty na základě článku autora Boylan [68]. V něm autor uvádí hodnoty modulu pružnosti 17 GPa a poissonova konstantu 0,2. Na základě těchto hodnot lze vypočítat šířku dotykové plochy (4-1) a maximální napětí v kontaktu (4-2).

$$b = \sqrt{\frac{2F}{\pi l} \frac{(1 - \mu_1^2)^2}{E_1} + \frac{(1 - \mu_2^2)^2}{E_2}} \cdot \frac{1}{d_1} \quad (4-1)$$

$$b = \sqrt{\frac{2 \cdot 80 \text{ N}}{\pi \cdot 2 \cdot 60 \text{ mm}} \frac{(1 - 0,35^2)^2}{125 \text{ GPa}} + \frac{(1 - 0,2^2)^2}{17 \text{ GPa}}} = 18,86 \text{ } \mu\text{m}$$

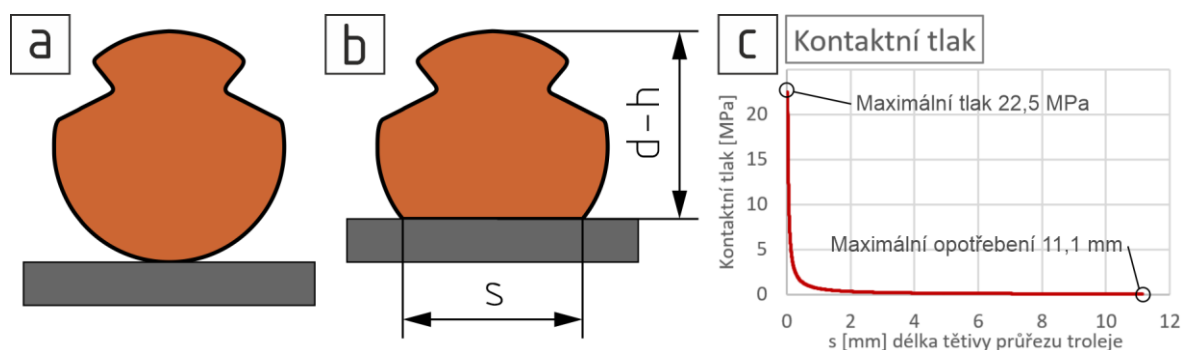
$$p_{max} = \frac{2F}{\pi b l} = \frac{2 \cdot 80 \text{ N}}{\pi \cdot 18,86 \text{ } \mu\text{m} \cdot 2 \cdot 60 \text{ mm}} = 22,5 \text{ MPa} \quad (4-2)$$

p_{max}	maximální napětí v kontaktu	[MPa]
b	poloviční šířka dotykové plošky	[μm]
F	normálová síla působící na kontakt	[N]
l	délka kontaktu	[mm]
μ_1	poissonova konstanta – měď	[]
μ_2	poissonova konstanta – uhlík	[]
E_1	modul pružnosti – měď	[GPa]
E_2	modul pružnosti – uhlík	[GPa]
d_1	průměr trolejového drátu	[mm]

Maximální kontaktní tlak tedy dosahuje hodnoty poměrně nízkých 22,5 MPa. Pokud však dojde k opotřebování trolejového drátu, tak jak je vidět na obr. 2-8 d), kontaktní podmínky se změní. Dojde ke tření dvou rovinných ploch a kontaktní tlak značně poklesne. Pokud budeme uvažovat rovnoměrné rozložení tlaku na celý povrch, pak kontaktní tlak těchto dvou ploch lze vypočítat pomocí rovnice (4-3). Kde F a l jsou stejné veličiny použité pro výpočet rovnice (4-2) a s je délka tětivy opotřebované hrany průřezu trolejového drátu, viz obr. 4-13 b).

$$p_{kont}(s) = \frac{F}{l \cdot s} \quad (4-3)$$

Maximální hodnota opotřebení průřezu troleje může nabývat dle předpisu E10 Správy železnic [30] rozmezí 20 až 40 %. Pokud budeme uvažovat nižší hodnotu pak pro trolejový drát průřezu 120 mm² je maximální hodnota s 11,1 mm. Dosazením do rovnice (4-3) jako maximální hodnotu, umožňuje popsat závislost kontaktního tlaku na opotřebení trolejového drátu po celou délku své životnosti. Druhou mezí je pak maximální tlak, který nemůže překročit Hertzův tlak spočtený v rovnici (4-2). Tato funkce nepřímé úměry je vidět na obr. 4-13.



obr. 4-13 a) průřez stykem nového trolejového drátu a sběrače, b) styk opotřebovaného trolejového drátu a sběrače, c) graf závislosti kontaktního tlaku na míře opotřebování trolejového drátu

Volba normálové síly pro tribologické zkoušky

Jako dvojice pro modelování kontaktu byl použit uhlík o šířce 6 mm a měděná destička o šířce 5 mm, jež byly popsány v předcházející části. Ideální kontaktní plocha bude obdélník. Výsledky z grafu obr. 4-13 c) ukazují, že kontaktní tlak nabývá různých hodnot. Tato skutečnost nám poskytuje větší volnost při volbě zátěžné normálové síly v kontaktu. Vzhledem k parametrům tribometru zejména rozsahu silových snímačů, byla zvolena hodnota normálové síly 15 N. Při této hodnotě síly dosahuje kontaktní tlak přibližně 0,5 MPa a ekvivalent skutečného kontaktu by měl velikost opotřebení s o velikosti 1,33 mm.

Postup měření

Pro měření na tribometru byly použity snímače síly s nižším rozsahem, tedy 120 a 60 N. Zátěžná normálová síla byla zvolena, viz výše, na hodnotu 15 N. Pro měření byl nastaven opakovací cyklus. Rychlost posuvu tribometru byla nastavena na nejvyšší možnou hodnotu 7 mm/s při standartní rampě zrychlení 0,1 s. Dráha byla zvolena vzhledem k délce vzorku na 40 mm. Jelikož bylo cílem měření dosažení ustálené velikosti součinitele tření, byla délka experimentů navržena na 1 h.

Vzorek trolejového drátu byl vždy mezi měřeními vložen do ultrazvukové čističky a poté ještě čištěn pomocí acetonu. Následně byl vážen. K tomu byla použita analytická váha KERN ABJ 320-4NM, která dokáže měřit s přesností na 1 mg a má opakovatelnost 0,2 mg. Dále byla na vzorku měřena drsnost, a to na celé jeho šíři na pevně stanovém místě přibližně uprostřed skluzové dráhy. Pro každý experiment byl použit nový uhlík s broušeným povrchem. To bylo nezbytné kvůli jeho kontaminaci kapalinami. Směsi proti námraze byly aplikovány pomocí opakovací mikropipety Eppendorf Multipette Plus formou kapek $6 \times 4 \mu\text{l}$. Kapky byly rozprostřeny po celé délce vzorku troleje, před zahájením smýkání uhlíku. Prvním posuvem uhlík rozprostřel kapalinu na vzorku troleje po celé skluzové dráze.

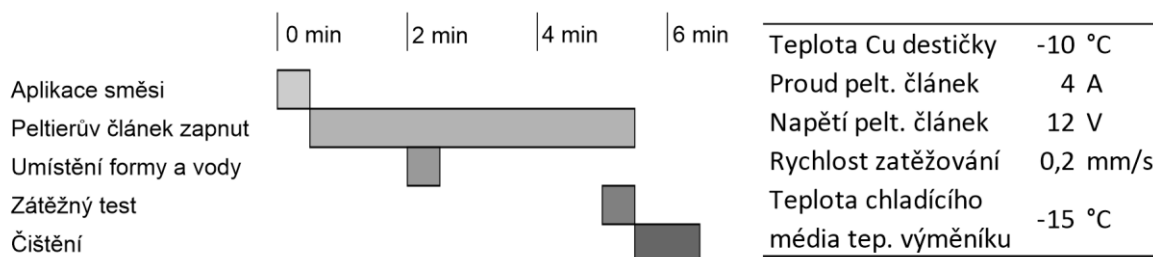
Před srovnávacím měření kapalin proběhly nejdříve dva testy bez protinámrazových kapalin, u nichž byl měřen jen součinitel tření. Cílem bylo jednak ověření opakovatelnosti, a také zaběhnutí vzorku troleje. Následovalo první plnohodnotné měření s vážením, šlo ovšem o referenční suchý kontakt. Následně byly měřeny všechny protinámrazové směsi. Mazivo Interflon Lube EPR, pak bylo záměrně měřeno nakonec, protože by mohlo kontaminovat povrch vzorku troleje svými teflonovými částicemi.

4.3.4 Hodnocení vlivu kapalin na adhezi ledu k trolejovému drátu

Během experimentů bylo pozorováno, že námraza vzniklá na vrstvě protinámrazové směsi vykazuje nižší pevnost vůči původnímu povrchu. K tomuto jevu docházelo i v případě, že protinámrazová směs byla vodou z námrazy natolik zředěná, že také ztuhla. Z toho důvodu byla sestavena měřící aparatura, která by měla tento jev měřit.

Zařízení využívá univerzálního tribometru Rtec. Na něm je zaznamenávána tečná síla pomocí silového snímače s rozsahem 1 kN. Na tribometru byl také realizován zátěžný posuv nastavený na nejnižší hodnotu 0,2 mm/s při rampě zrychlení 0,1 s. Data byla měřena při frekvenci 1 kHz. Prostor pro tvorbu ledu ve formě má tvar čtverce o straně 1 cm se zaoblenými rohy $R = 0,5 \text{ mm}$. Měděná destička přišroubovaná na chladnou stranu Peltierova článku byla broušena a celá plocha, kde docházelo k tvorbě ledu, byla měřena profilometrem. Toto měření neukázalo žádné výrazné rýhy v povrchu, které by mohly ovlivnit měření. Drsnost povrchu byla naměřena $R_a = 0,19 \mu\text{m}$.

Před každým měřením byla nejprve vrstva ledu a kondenzované námrazy na měděné destičce nechána roztát. To bylo možné díky pouhému vypnutí Peltierova článku, takže nebylo nutné upravovat teplotu chlazení výměníku. Vzniklá voda byla setřena a povrch vyčištěn od zbytků alkoholu acetonem. Poté bylo na povrch aplikováno $5 \times 4 \mu\text{l}$ kapek protinámrazové směsi pomocí opakovací mikropipety a rozetřeno štětcem. Následovalo vychlazení směsi na $-10 \text{ }^\circ\text{C}$. Až poté byla na povrch přiložena forma a naplněna 250 μl destilované vody o laboratorní teplotě. Po zmrznutí vody byl pomocí posuvu led utrhnut, přičemž byla zaznamenávána tečná síla. Rameno tribometru se v tomto případě nedotýkalo povrchu a normálová síla byla nulová. Celý postup je znázorněn na diagramu obr. 4-13.



obr. 4-14 Diagram postupu měření adheze ledu na tribometru a podmínky experimentu

Celkem bylo naměřeno deset měření bez použití protinámrazové směsi. Následně sedm měření pro každou z osmi směsí. Při měření byla také zaznamenána teplota, pomocí termočlánku umístěného ve vyvrtané díře uvnitř měděné destičky.

4.3.5 Měření kontaktního úhlu rozhraní kapalina – trolejový drát

V rámci měření bylo porovnáváno osm protinámrazových směsí popsaných výše a také destilovaná voda. Všechny vzorky byly měřeny celkem sedmkrát. Kapalina byla aplikována pomocí opakovací mikropipety Eppendorf Multipette Plus. Její přesnost při dávkování je 0,1 μl . Každé měření představovala jedna kapka o objemu 2 μl , což je zároveň nejnižší možný dávkovaný objem. Co nejnižší objem je důležitý, proto aby se minimalizoval vliv tíhové síly kapaliny. Kapka byla dávkována přímo na povrch, aby se odstranil vliv dynamiky kapky při jejím dopadu. Po vyfocení kapky byl vzorek mědi čištěn pomocí izopropylalkoholu a po jeho odpaření bylo měření opakováno.

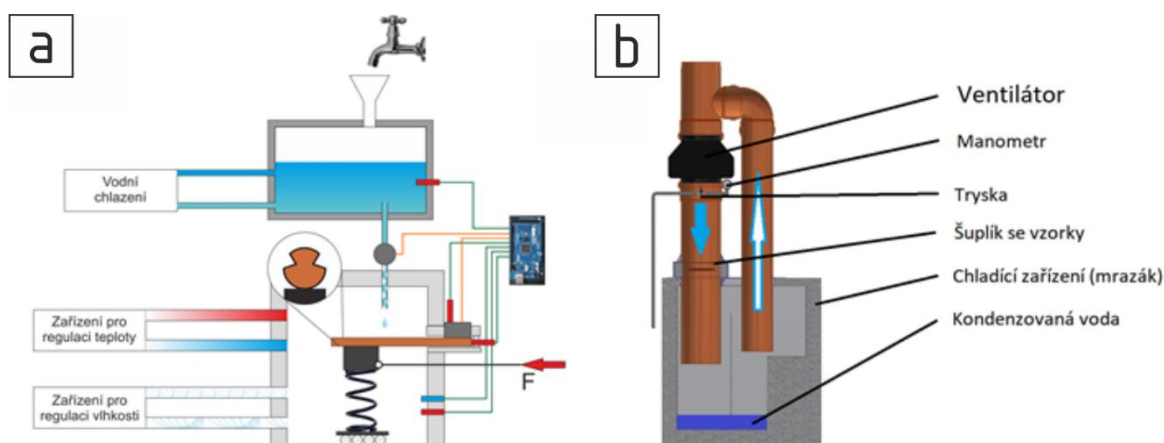
Pro určení velikosti kontaktního úhlu byl použit program ImageJ se zásuvným modulem Contact angle [69]. Ten na základě dvou označených bodů definující základnu kapky a pěti dalších bodů definující rozhraní kapalina-vzduch. Takto aproximuje povrch pomocí koule a elipsy. Pro srovnání byl použit kontaktní úhel spočtený na základě aproximace elipsou. Jeho hodnota je vypočtená jako aritmetický průměr levého a pravého kontaktního úhlu. Odchylka od hodnoty kontaktního úhlu pro kruh byla použita pro kontrolu. Autoři modulu také uvádí, že maximální velikost kapky by se měla pohybovat do 3 až 5 μl .

5 VÝSLEDKY

5.1 Konstrukce testovacího zařízení pro tvorbu námrazy

5.1.1 Konceptní řešení

Pro návrh testovacího zařízení bylo nejdříve rozhodováno nad způsobu depozice vody na povrch vzorku trolejového drátu. Uvažováno bylo nad dávkováním vody kapáním přímo na drát v podchlazeném prostředí, schéma zařízení zobrazené na obr. 5-1 a). V tomto případě by pro testování bylo zanedbáváno proudění vzduchu a dosáhli bychom pravděpodobně pouze jediného typu námrazků a to ledovky. Druhá uvažovaná varianta zobrazená na obr. 5-1 b) počítala s cirkulací vzduchu v uzavřeném okruhu pomocí ventilátoru a sycení vzduchu tryskou. Tímto by bylo možné dosáhnout na povrchu drátu podmínky bližší venkovnímu prostředí a mohli kromě ledovky, dosáhnout i vzniku námrazových jevů. Především z toho důvodu byla jako vhodnější vybrána právě druhá varianta.



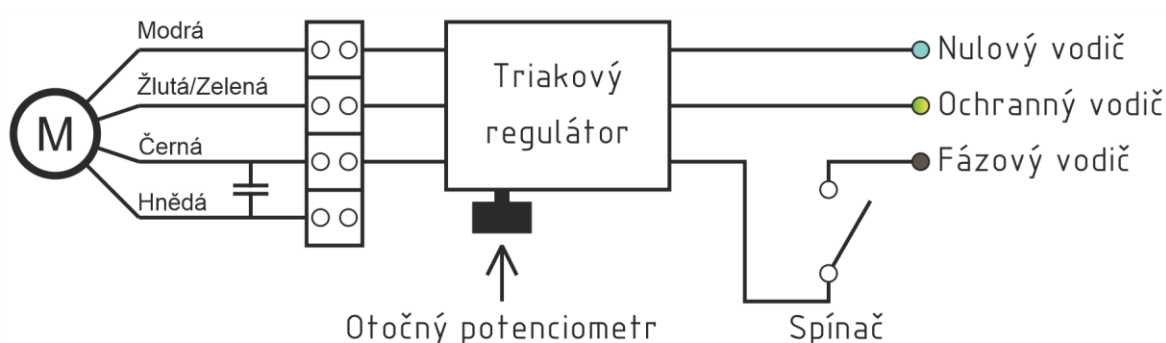
obr. 5-1 Konceptní řešení testovacího zařízení pro zkoumání námrazy na trolejovém drátu, a) návrh 1. bez nucené cirkulace vzduchu, b) návrh 2. s nucenou cirkulací vzduchu

5.1.2 Konstrukce

Při návrhu byly nejdříve uvažovány dvě varianty, které se lišily v provedení cirkulačního okruhu. První varianta zobrazená na obr. 5-1 b) je řešena s oběhem mimo prostor mrazícího zařízení. Výhodami této varianty by byla nižší půdorysná velikost, cirkulační kruh by mohl být navržen velkoryseji, na vzorky by byla rovnoměrnější depozice vody díky odstranění vlivu gravitačního zrychlení a také komora se vzorky by byla snadno přístupná. Nevýhodami této varianty by pak bylo především nutnost úpravy a nevratného poškození víka chladícího zařízení, náročnější vyvedení izolace a tím vyšší minimálně dosažitelná teploty. Druhá varianta naproti tomu celý cirkulační okruh umísťuje do chladícího zařízení, tak jak je nastíněno na schématu obr. 4-5.

Výhodami této varianty je především lepší kontrola nad teplotními podmínkami a lepší tepelná izolace, díky umístění uvnitř chladicího zařízení. Nevýhodou je zde spatřováno především menší zástavbový prostor a horší přístup ke vzorkům. Nakonec byla dále řešena konzervativnější druhá varianta, která celé zařízení umísťuje do chladicího zařízení. Především kvůli absenci fyzického zásahu do chladicího zařízení.

K nucenému oběhu vzduchu je zde uvažován ventilátor DALAP Turbine M 150. Ten má nominální velikost pro přípojná potrubí 150 mm. Jeho důležitou vlastností je stupeň krytí IP X4, což by mělo zajistit jeho ochranu proti vodě stříkající ve všech úhlech. Jeho nominální objemový průtok vzduchu za hodinu je 530 m³/h, což při předpokládaném průřezu testovací komory 120 x 150 mm umožňuje dosáhnout teoretické rychlosti proudění až 6,5 m/s. K pohonu je využíván asynchronní elektromotor, který je napájen pomocí 230 V střídavých.



obr. 5-2 Schéma zapojení ventilátoru a jeho ovládání pomocí obvodu s triakovým regulátorem

Jako nejvhodnější otáčková regulace tohoto stroje je pomocí frekvenčního měniče, která zajistí regulaci otáček v plném rozsahu. Nevýhodou frekvenčních měničů je jejich vysoká finanční nákladnost v jednotkách tisíc. Proto byla jako alternativa zvolena regulace pomocí triaku. Ta sice neumožní regulovat otáčky elektromotoru v plném rozsahu, to ovšem pro potřeby tohoto zařízení nebude nutné. Další nevýhodou je, že snižování velikosti otáček od maximální hodnoty dané frekvencí střídavého proudu užívaného v rozvodné síti, je možné pouze za cenu zvyšování skluzu elektromotoru, což vede k tepelným ztrátám. Velikou výhodou je naopak cena, která je o řád nižší než v případě frekvenčního měniče. Schéma zapojení je zobrazeno na obr. 5-2.

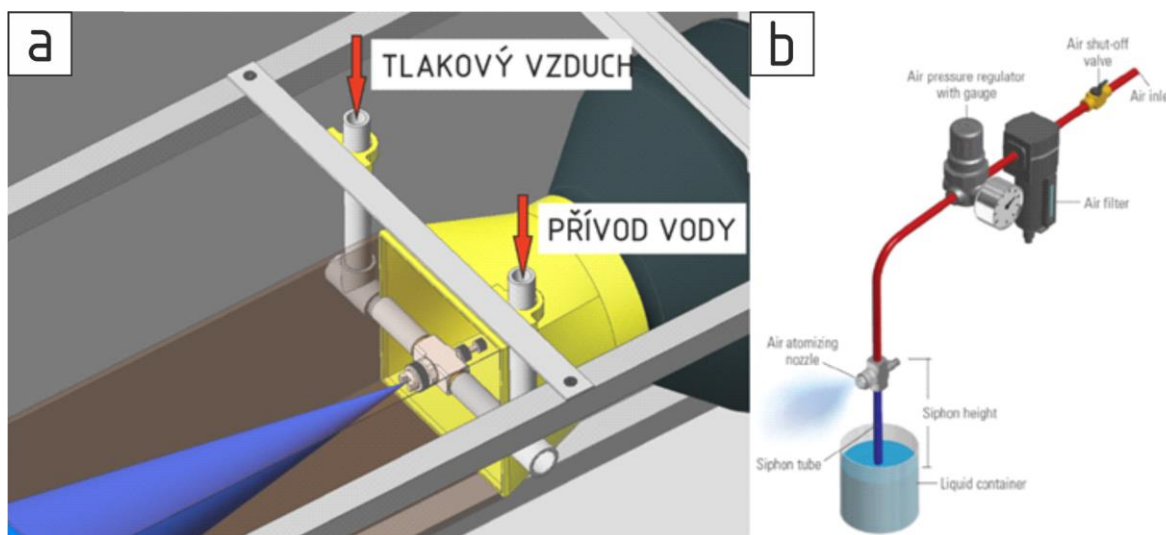
Hydraulický a pneumatický okruh

Pro rozprašování vody do proudu vzduchu byla vybírána tryska, která by měla dostatečně malý objemový průtok a zároveň k provozu nepotřebovala tlakovou vodu. Tyto požadavky naplňovala dvoumédiová tryska s externím míšením médií D-SU1A-W s tělem B1/4J [70] od společnosti Spraying System Czech. Ta pro svoji funkci využívá tlakového vzduchu a přívod vody je řešen jako sifonový, což je znázorněno na obr. 5-3 b).

tab. 5-1 Parametry trysky SU1A hodnoty označují kapacitu trysky [l/h] při daných podmínkách [70]

Tlak vzduchu [bar]	Průtok vzduchu [l/min]	Kladná velikost vodní sloupec [cm]				Záporná velikost vodního sloupec [cm]			
		45	30	15	10	20	30	60	90
0,7	11,3	1,5	1,3	1,1	0,87	0,68	0,53	–	–
1,5	17	1,8	1,7	1,5	1,3	1,2	1,1	0,62	–
3	28	2,1	1,9	1,7	1,5	1,4	1,3	1,1	0,76
4	36	2,2	2	1,8	1,6	1,5	1,4	1,2	0,87

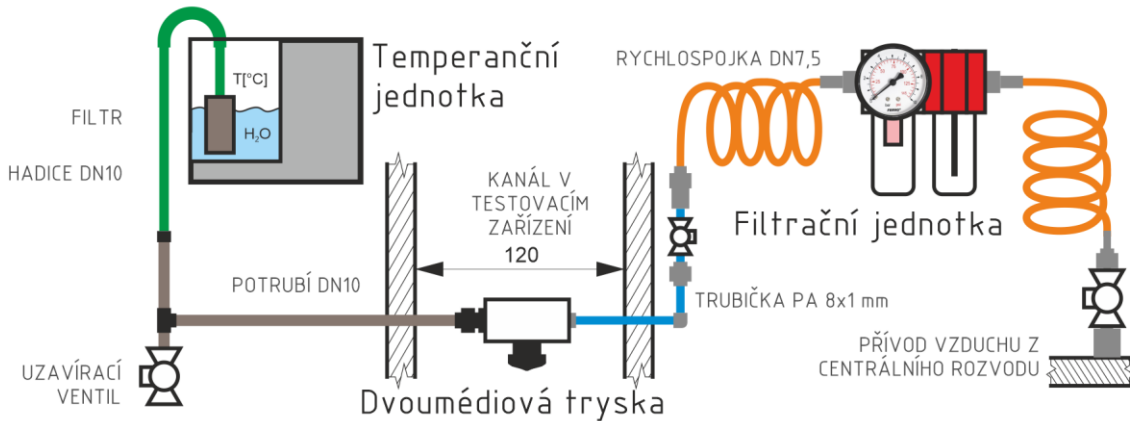
Protože je laboratoř vybavena tlakovým vzduchem odpadla nutnost zakoupit drahé vodní čerpadlo pro zajištění tlakové vody. Nevýhodou této trysky je poměrně malý úhel rozprašování a to 18°. Průtok tryskou se dá regulovat jednak výškou vodního sloupce, ze kterého je voda čerpána a také přiváděným tlakem vzduchu pomocí redukčního ventilu a manometru, tak jak je vyneseno v tab. 5-1. Velikost průtoku tryskou byla navržena ve vztahu k maximálnímu mrazicímu výkonu chladicího zařízení, tak aby množství přiváděné vody hmotnostně odpovídalo mrazicí kapacitě mrazáku. Velikost kapek vody by se po atomizaci měla pohybovat v rozmezí 20 až 30 μm v závislosti na parametrech tlaku vzduchu a výšky vodního sloupce u přívodu vody.



obr. 5-3 Tryska SU1A a) Při instalaci v testovacím zařízení s přívodem míšených médií a zobrazením rozprašovaného kužele, b) Schematické zobrazení správné sifonové instalace trysky [70]

Napojení trysky je skrze kuželový trubkový závit R 1/4". Přívod vody je řešen jako samonosný skrze ocelovou pozinkovanou trubku opatřenou na koncích zářeznými prstenci a převlečnou maticí. Tato trubka pak skrze redukci nese i trysku, přičemž sama je upevněna do rámu testovacího zařízení. Vně cirkulačního okruhu je umístěna T spojka a vypouštěcí kohout, jakožto nejnižší místo hydraulického okruhu. Přívod vody je řešen pomocí hadice z měkčeného PVC. Do té je přiváděna destilovaná voda ze zásobníku, případně temperační jednotky. Celé schéma je znázorněné na obr. 5-4.

Pneumatický okruh je propojen pomocí PA hadic 8 x 1 mm a spojovací prvky jsou od firmy AIGNEP. Vývod umístěný na vrchu rámu testovacího zařízení je zakončen rychlospojkou DN7,5 EU, na kterou je připojena spirálová hadice. Ta propojuje okruh s filtrační a regulační jednotkou a pak dále do centrálního rozvodu vzduchu. Kapacita filtrační jednotky byla volena s ohledem na nominální objemový průtok tryskou, jež je 11,3 l/min.



obr. 5-4 Pneumatický a hydraulický okruh zařízení pro tvorbu námrazy

Kontrola stavu skupenství přiváděné vody

Při návrhu zařízení hrozí nebezpečí, že by rozstříkovaná voda tryskou mohla zmrznout dříve než před dopadem na testovaný vzorek. Proto bylo nutné ověřit, zdali míra ochladnutí není kritická. Tento problém byl rozdělen na dvě části, a to chladnutí vody v přívodním potrubí a pak samotných kapek po opuštění trysky.

Při vedení vody k trysce bude kapalina procházet chladným prostředím. Je proto nezbytné určit vhodnou míru izolace. Samotné potrubí se bude skládat ze dvou částí, a to ocelové trubky s izolací a hadice z měkčeného PVC. Pro výpočet tepelných ztrát využijeme vzorec (5-1), který závisí na součiniteli prostupu tepla válcovou stěnou U_z (5-2). Proměnná U_z určuje tepelný tok jedním metrem potrubí v závislosti na teplotním rozdílu. Tento vzorec můžeme použít za předpokladu, že velikost tepelných ztrát při přestupu tepla mezi potrubím a kapalinou bude nízká.

$$Q_{zr} = U_z l (t_{in} - t_{out}) \quad (5-1)$$

$$U_z = \frac{\pi}{\frac{1}{2\lambda_t} \cdot \ln \frac{d}{d-2s_t} + \frac{1}{2\lambda_{iz}} \cdot \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\alpha_e D}} \quad (5-2)$$

kde:

λ_t	součinitel tepelné vodivosti pro potrubí	[W/m K]
λ_{iz}	součinitel tepelné vodivosti pro izolaci	[W/m K]

α_e	součinitel přestupu tepla mezi izolací a vzduchem	[W/m ² K]
d	vnější průměr potrubí	[m]
s_t	tloušťka stěny potrubí	[m]
D	vnější průměr izolace	[m]

Součinitel přestupu tepla α_e volíme konstantu 10 W/m² K, za předpokladu, že se jedná o běžné nenucené proudění. Teplota vody v potrubí $t_{in} = 23\text{ °C}$ byla volena dle standardní teploty v laboratoři. Teplota $t_{out} = -15\text{ °C}$ pak představuje předpokládanou hodnotu, při které budou testy probíhat. Zbylé parametry jsou vypsány v tabulce tab. 5-2. Pro určení o kolik se voda v potrubí ochladí, použijeme vzorec (5-3).

$$\Delta t_w = \frac{Q_{zr}}{\dot{m}_w c_w} \quad (5-3)$$

Ten vychází z vzorce pro výpočet množství tepla z měrné tepelné kapacity c_w , která má pro vodu hodnotu 4,18 kJ/kg K. Další proměnou je \dot{m}_w , což je hmotnostní tok vody potrubím s předpokladem, že hustota vody je 1000 kg/m³. Objemový průtok byl zvolen dle použité trysky a předpokládaných podmínek 1,8 l/h.

tab. 5-2 Tabulka tepelných ztrát v potrubí vedoucí vodu k trysce

Sekce	Materiál	Průřez [mm]	Délka [mm]	Součinitel tepelné vodivosti [W/m K]	Ztrátový tepelný tok Q_{zr} [W]	Pokles teploty Δt_w [°C]
Hadice	PVC	10/14,5	300	$\lambda_t = 0,2$	4,577	2,19
Potrubí	ocel	10/12	150	$\lambda_t = 50$	2,148	1,03
Potrubí s izolací	ocel, PE pěna	10/12/22	150	$\lambda_{iz} = 0,04$ $\lambda_t = 50$	1,587	0,76

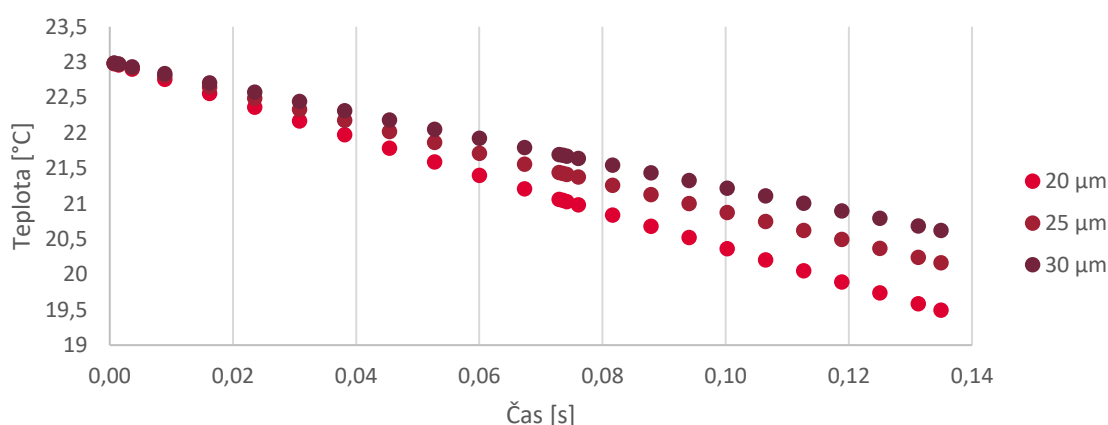
Z tabulky tab. 5-2 je patrné, že pokles teploty vody během proudění v potrubí je nízký, a to i při nepoužití izolace. Celkový pokles teploty je v případě hadice a trubky s bez izolace 3,22 °C a 2,95 °C pro hadici a trubku s izolací. Je však třeba zmínit, že kolem potrubí bude probíhat nucená konvekce, a tak bude pokles teploty zřejmě vyšší. Také je možné, že voda bude v potrubí nějakou dobu stát. Nicméně pokud bude do potrubí proudit voda o laboratorní teplotě, nebude s podchlazením problém.

Výpočet vzdálenosti vzorků od trysky byl pomocí goniometrických funkcí a velikosti rozprašovaného kuželu trysky. Při výšce kanálu a 150 mm a šířce 120 mm je nutné umístit vzorky 475 mm od trysky.

tab. 5-3 Tabulka ochlazení kapičky vody o různém průměru rozprašené tryskou a při různých rychlostech proudění. Hodnoty změny teploty jsou v °C.

Počáteční teplota kapičky	23 °C			13 °C			3 °C		
Velikost kapičky [μm]	20	25	30	20	25	30	20	25	30
Doba letu (6,5 m/s) 0,073 s	1,94	1,56	1,35	1,43	1,15	0,96	0,92	0,74	0,62
Doba letu (3,5 m/s) 0,135 s	3,51	2,83	2,38	2,29	2,09	1,75	1,66	1,34	1,13

Dalším místem, kde dochází k ochlazení vody je po opuštění trysky ve větrném tunelu. Kapičky o velikosti přibližně 20 až 30 μm urazí vzdálenost mezi tryskou a testovanými vzorky za přibližně 0,073 s při rychlosti proudění v tunelu 6,5 m/s, respektive 0,135 s při 3,5 m/s. Pro zjištění ochlazení kapičky vody byla využita Transient Thermal analýza v programu ANSYS workbench. Modelem pro analýzu se stali tři koule rozdílných poloměrů, které posloužili jako modely kapiček vody. Jako okrajové podmínky byla počáteční teplota 23 °C a konvekce na povrchu kapiček o velikosti 10 W/m² K. Ačkoli se budou kapičky pohybovat vysokou rychlostí v proudu vzduchu, budeme předpokládat jejich zanedbatelný relativní pohyb k tomuto proudu, a proto můžeme použít právě tuto hodnotu pro běžnou konvekci. Výsledky jsou znázorněny v tab. 5-3 a obr. 5-5.



obr. 5-5 Graf závislosti povrchová teplota kapiček v čase při letu testovacím tunelem, znázorněny jsou tři rozdílné velikosti kapek

Rám a chladící zařízení

Samotné chladící zařízení je standartní pultový mrazák *Zanussi ZFC 41400 WA* o vnitřním objemu 400 l. Jeho mrazicí výkon je 19 kg/den. Výparník i kondenzátor je umístěn ve stěnách mrazáku, takže nemůže dojít k jeho mechanickému poškození. Navíc díky rovnoměrnému rozložení výparníku na celém vnitřním povrchu mrazáku, je uvnitř dosaženo velice nízkého teplotního gradientu oproti mrazákům, které mají výparník pouze při jedné stěně. Regulace je mechanická pomocí termostatu, protože je proporciální, nelze volit přesnou teplotu. Z měření bylo zjištěno, že regulovaná teplota prázdného mrazáku kolísá v regulačním intervalu přibližně 4 °C, a to tím je regulace řešena jako dvoustavová pomocí kompresorového chlazení. Hodnota minimální dosažené teploty byla -31 °C, v případě kdy byla regulace nastavena na maximální výkon. Při nastavení regulace mrazáku na nejnižší výkon bylo naměřeno nejvyšší teploty - 14 °C.

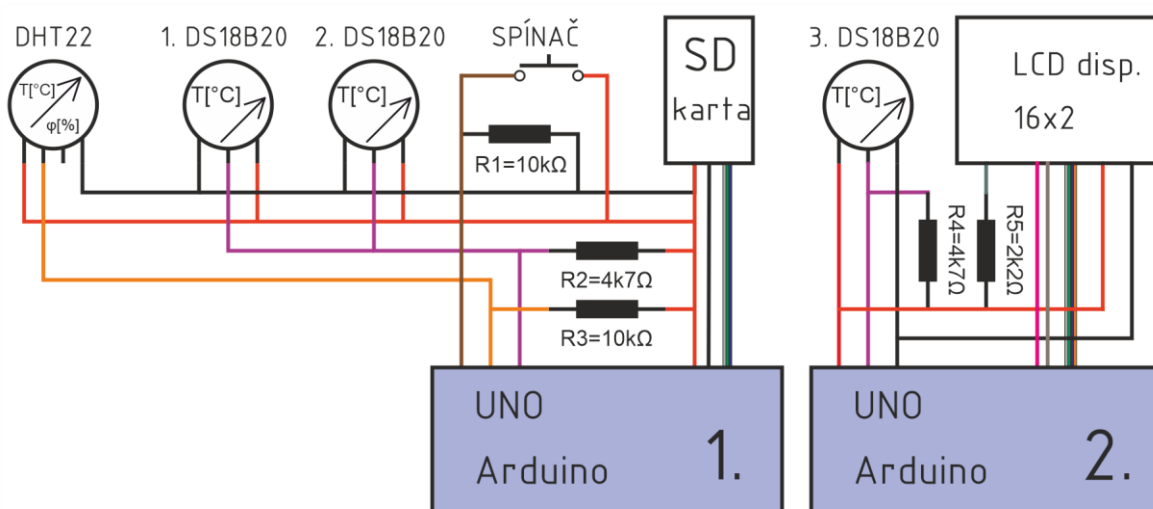
Uvnitř mrazáku byla vytvořena konstrukce s užitím hliníkových profilů. Tato konstrukce poslouží k upevnění ostatních komponent, protože do samotných stěn mrazáku není možné vrtat. Vzduchovod je tvořen z normalizovaných dílů pro ventilační potrubí z materiálu PVC.

Některé komponenty jsou vzhledem k tvarové složitosti navrženy jako tisknuté pomocí FDM tisku z materiálu ABS. Zbytek zejména rovinných spojovacích šachet je vyrobeno z polykarbonátových desek. Průřez vzduchovodu je obdélníkový 120 mm na šířku a 150 mm na výšku, přičemž u ventilátoru jsou redukce na kruhový profil průměru 150 mm.

Měřicí řetězec

Pro sledování průběhu teplot a vlhkosti uvnitř zařízení bude sloužit jednodeskový počítač Arduino. V základu se počítá v měření zejména teploty a vzdušné vlhkosti v místě vzorků. K tomu budou sloužit teplotní senzor DS18B20 [71] a kombinovaný teploměr-vlhkoměr DHT22. Prvně jmenovaný teplotní senzor je číslicové čidlo od firmy Maxim s měřitelným rozsahem -55 až 125 °C. Při dodržení teplotního rozsahu -10 až 85 °C vykazuje dobrou přesnost $\pm 0,5$ °C. Jeho další výhodou je možnost jejich zapojení na jeden datový pin pomocí sběrnice OneWire. Díky jeho poměrně nízké ceně je možné takto využít více pro monitorování teplot v celém testovacím zařízení. Teploměr a vlhkoměr DHT 22 [72] je oproti tomu nutné zapojovat na samostatný pin. Jeho teplotní rozsah je -40 až 80 °C při odchylce $\pm 0,5$ °C. Měření vlhkosti je možné v celém rozsahu 0 až 100 % relativní vlhkosti při odchylce ± 2 %.

Celkové schéma zapojení je zobrazené na obr. 5-6. Data ze senzorů budou ukládána na paměťovou kartu. V cirkulačním okruhu budou umístěny senzor vlhkosti a teplotní senzor 1. na začátku za ventilátorem, 2. teplotní senzor bude umístěn v místě testovaných vzorků. Senzor vlhkosti nebylo možné použít v místě vzorků, protože nemá potřebnou ochranu proti stříkající vodě. Zapojení druhého arduina s LCD displejem bude sloužit pouze k monitorování teploty v testovacím zařízení a jeho teploměr bude umístěn vně cirkulačního okruhu.



obr. 5-6 Zapojení měřícího řetězce

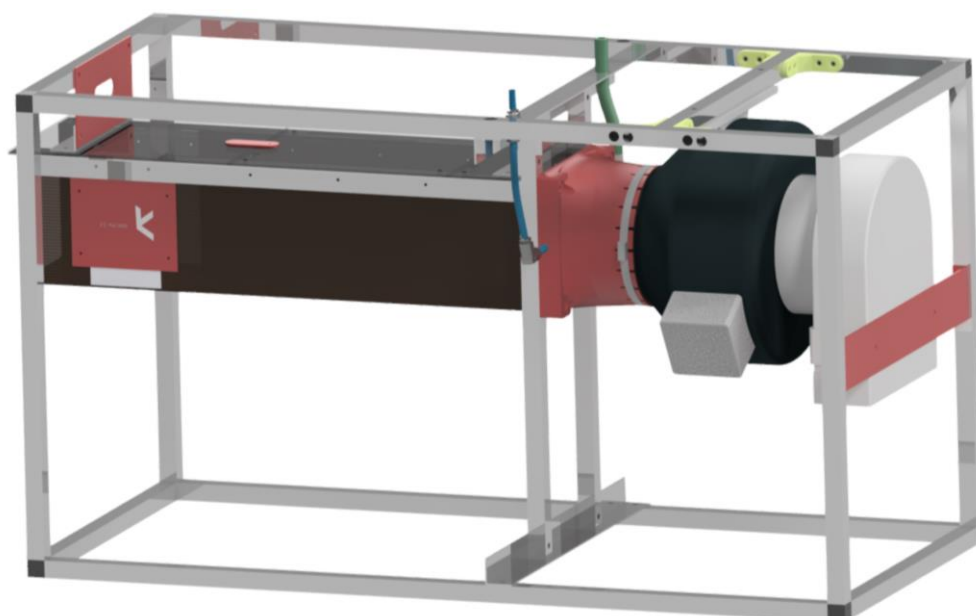
Parametry přístroje

Zkušební vzorky jsou v podobě trolejového drátu průřezu 120 mm^2 , které mají délku 122 mm. Vzorky budou umístěny v testovací sekci vzduchovodu, tak aby byli přístupné pomocí odnímatelného krytu. Jejich uchycení bude pomocí tvarových kapes na stěně testovací sekce vzduchovodu.

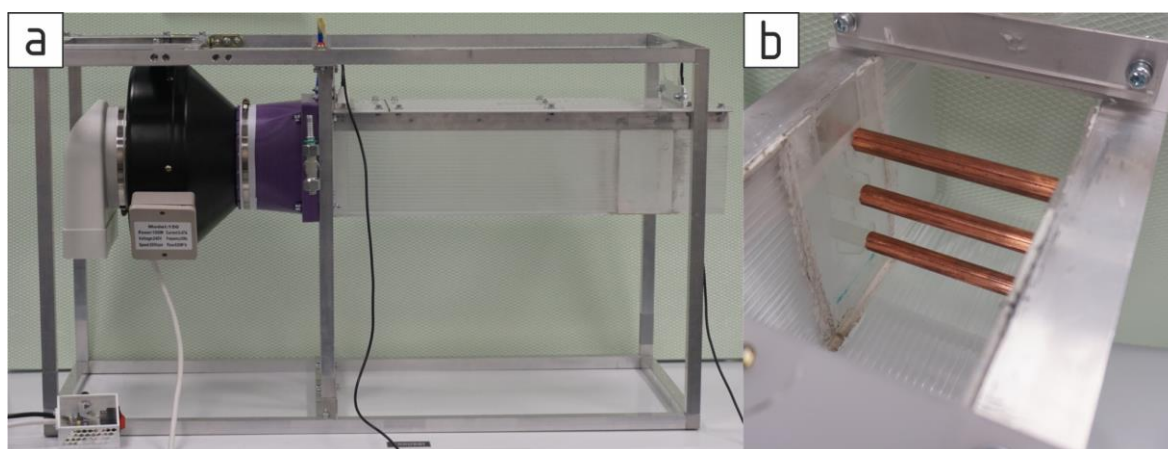
Celkový pohled na zařízení je.

Parametry:

- Počet zkušebních vzorků 3 ks
- Rychlost proudění vzduchu 3 až 6 m/s
- Provozní teplota až $-25 \text{ }^\circ\text{C}$
- Velikost rozprašovaných kapiček vody 20 až $30 \text{ }\mu\text{m}$



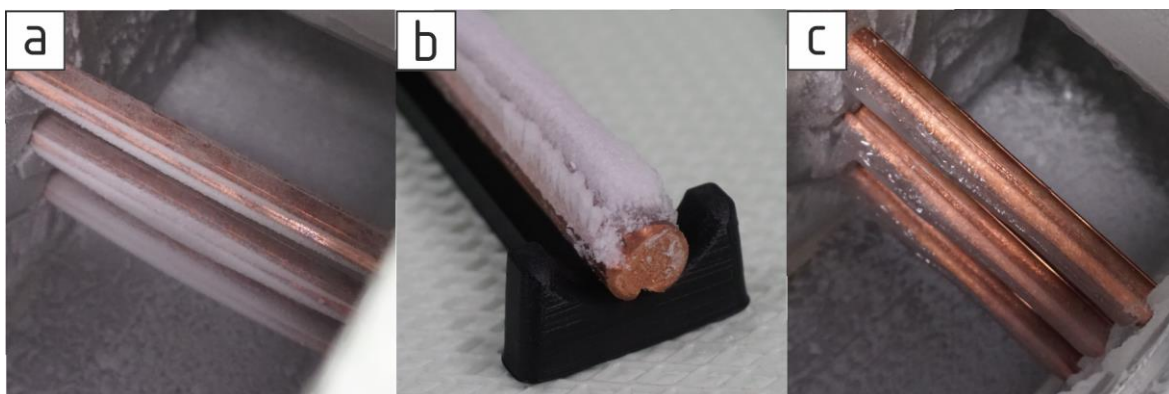
obr. 5-7 Finální návrh testovacího zařízení pro tvorbu námrazy



obr. 5-8 Vyrobené testovací zařízení, a) celkový pohled z boku, b) detail na sekci vzduchovou se vzorky trolejového drátu

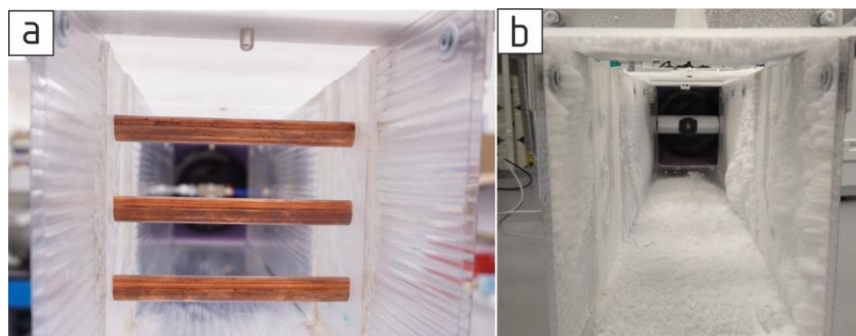
Ověřovací experiment

Po sestavení zařízení bylo zkoušeno. V rámci volby vhodných parametrů pro testování byla měněna rychlost proudění vzduchu, teplota uvnitř větrného tunelu a tlak trysky. Dle pozorování typ vzniklé námrazy závisel především na rychlosti tuhnutí vody do pevného stádia. Pokud byla teplota vzduchu v zařízení snížena hlouběji pod $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, a vzorky byly dostatečně podchlazeny, začala na nich vznikat krystalická námraza, viz obr. 5-9 a). Pokud byla teplota vyšší a teplota přiváděné vody se pohybovala kolem $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, pak vznikala námraza zrnitá, viz obr. 5-9 b). Pokud nebyly vzorky předchlazené, docházelo u nich ke vzniku zejména v počáteční fázi průsvitné námrazy viz obr. 5-9. Ustáleného růstu průsvitné námrazy bylo dosaženo zvýšením teploty vzduchu na $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ a snížením otáček ventilátoru na 50 %.



obr. 5-9 Námrazové jevy vzniklé v testovacím zařízení, a) krystalická námraza, b) zrnitá námraza, c) průsvitná námraza

Měřena byla také reálná rychlost proudění vzduchu tunelem. Měření probíhalo pomocí anemometru HC-DT-8894 od výrobce CEM. Přesnost měření je $0,2\text{ m/s}$. Průměrná rychlost proudění na základě měření na čtyřech místech průřezu tunelu byla stanovena na $5,5\text{ m/s}$. Tato hodnota je asi o 1 m/s nižší, než bylo předpokládáno. Rozdíl je zřejmě způsoben tlakovými ztrátami při oběhu vzduchu. Měření rychlosti proudění bylo opakováno po námrazových experimentech. V klimatickém tunelu s námrazou bylo naměřena rychlost proudění $6,1\text{ m/s}$. Vzhledem k vytvoření vrstvy námrazy na stěnách tunelu dosahující tloušťky až 1 cm se tento výsledek dal očekávat. Pro zachování rovnoměrných experimentálních podmínek by bylo vhodné vývoj rychlosti proudění kompenzovat.



obr. 5-10 Zařízení před a po testu námrazy

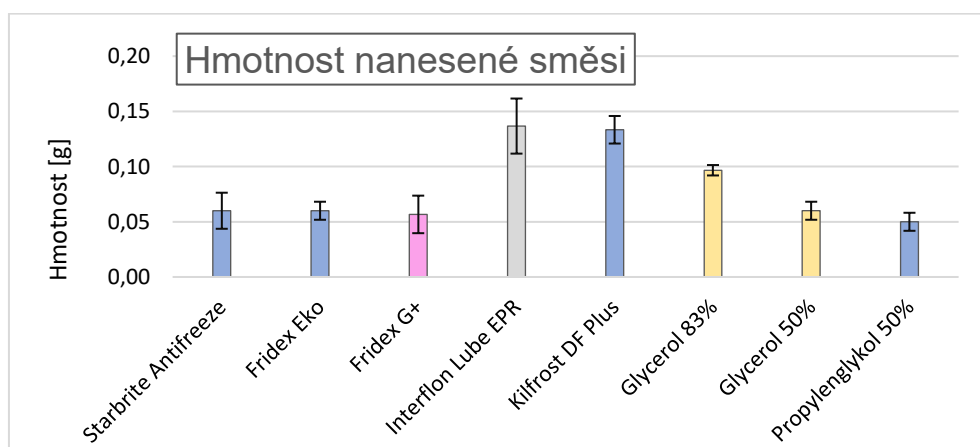
5.2 Vliv směsí na kinematiku námrazy

Během těchto experimentů byl zkoumán přímý vliv směsí na rychlost růstu námrazy. Experimenty byly prováděny v laboratoři kolejové dopravy na Ústavu konstruování při teplotě 21 °C. Při nanášení směsi na trolejový drát pomocí štětce byla snaha dosáhnout co nejvyššího aplikovaného množství. Problém byla však velmi nízká smáčivost povrchu mědi u většiny kapalin, což vedlo k tvorbě kapek, které z povrchu stékali. Nanášení však probíhalo při laboratorní teplotě. Je možné, že při skutečné aplikaci kolem teploty 0 °C, bude množství kapaliny ulpělé na povrchu trolejového drátu vyšší. Pouze Interflon Lube EPR umožňoval vytvoření rovnoměrné vrstvy směsi na povrchu trolejového drátu, viz obr. 5-11 a). Také Kilfrost umožňoval rozetření do vrstvy, nicméně po chvíli také začal tvořit malé kapky. Na druhé straně Glycerol 83 % sice tvořil velké kapky, nicméně zřejmě díky své vyšší viskozitě, se ho na povrchu udrželo poměrně dost, viz obr. 5-11 b). Příklad špatně se nanášející směsi je na obr. 5-11 c). Propylenglykol 50 % tvořil velké kapky, které díky nízké viskozitě velice snadno stékali z povrchu trolejového drátu. Fotografie dokumentující celý experiment jsou součástí Přílohy 3.



obr. 5-11 Forma nánosu směsi na povrchu trolejovém drátu, a) Interflon Lube EPR, b) Glycerol 83 %, c) Propylenglykol 50 %

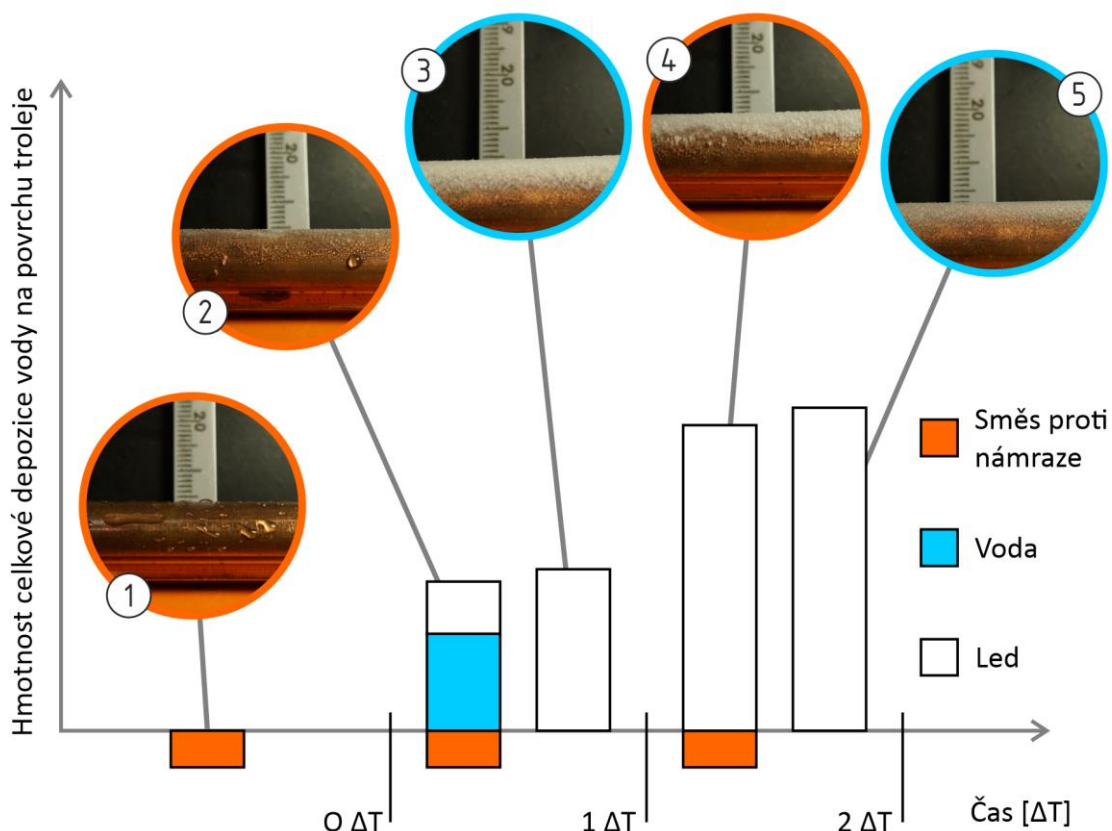
Tento předpoklad potvrzují i naměřená data. V rámci experimentu bylo měřeno množství aplikované protinámrazové směsi. Výsledky jsou shrnuty v grafu na obr. 5-12. Směrodatné odchylky jsou vyneseny na základě třech měření. Barevné členění sloupců koresponduje se základovou kapalinou směsí.



obr. 5-12 Graf popisující množství aplikované směsi na povrch trolejového drátu délky 122 mm

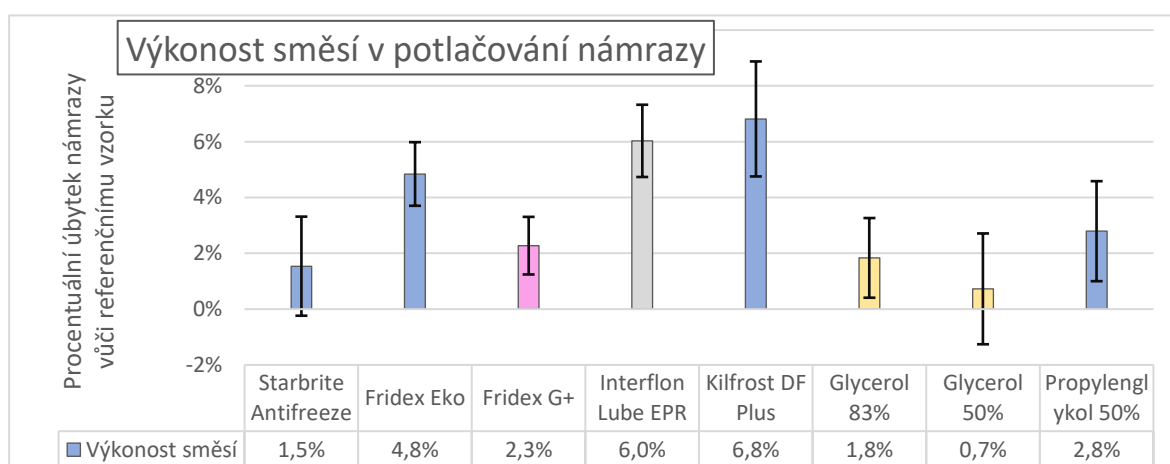
Vzorky trolejového drátu s aplikovanou protinámrazovou směsí pak byly vloženy do testovacího zařízení, kde na nich rostla námraza. Poznatkům z pozorování rozdílů v růstu námrazy na vzorku troleje s protinámrazovou směsí a bez shrnuje diagram na obr. 5-13. Diagram ukazuje hmotnost celkové depozice vody na trolejový drát. Platí především pro růst krystalické námrazy skrze kapky vody obsažené v proudu vzduchu dopadající na podchlazený povrch.

V případě depozice kapek vody na trolej bez námrazové směsi dochází k jejímu okamžitému mrznutí a vzniku krystalické námrazy (3). Pokud je na trolej aplikována nemrznoucí směs na bázi alkoholu, dochází k jejímu mísení s dopadajícími kapkami vody (2). Na povrchu tedy vznikne zředěná protinámrazová směs, které v místech s nižší koncentrací mrzne. Další stádium růstu námrazy u vzorku bez ochrany směsí je identické (5). Již vytvořená vrstva námrazy by mohla ovlivnit její další růst pouze v případě změny směru proudění větru. To kvůli tomu, že by se změnil nominální průřez zvětšený o vrstvu námrazy, protože ta roste pouze na návětrné straně. U vzorku s protinámrazovou směsí již v tomto stádiu došlo k vytvoření homogenní vrstvy námrazy (4). Ta překrývá vrstvu s nízkým obsahem alkoholu, která může být stále částečně ještě kapalná. V případě Interflonu Lube EPR se chování růstu námrazy bude spíše blížit vzorku bez protinámrazové směsi. S tím že mezi námrazou a trolejovým drátem se bude neházet tenká vrstva tohoto maziva.



obr. 5-13 Diagram popisující rozdílný růst námrazy na trolejovém drátu s protinámrazovou směsí a bez

Naměřené hodnoty shrnuje graf na obr. 5-14, který ukazuje, jaká bude výkonost směsí v zabránění vzniku námrazy. Respektive hodnoty ukazují průměrné procentuální snížení hmotnosti námrazy u vzorku opatřeného směsí oproti vzorku referenčnímu. Celkem byly provedeny tři měření každé kapaliny, přičemž z každého měření byly získány dvě hodnoty hmotnostního přírůstku námrazy. Oba byly porovnávány s referenčním vzorkem a posloužili pro výpočet průměrné hodnoty. Jako chybové úsečky je vynesena směrodatná odchylka získaná ze všech šesti měření každé směsi. Při testech byla také měřena referenční sada vzorků trolejového drátu bez protinámrazové směsi pomocí stejné metodiky. U nich byla sledována směrodatná odchylka, která v žádném z měření nepřekročila 1 % průměrné hodnoty hmotnosti námrazy. Přírůstek námrazy se pohyboval okolo 0,5 g/min na jednom vzorku trolejového drátu. Celkem tedy bylo měřeno přibližně 1,5 g námrazy pro první část experimentu, a pak 3 g.



obr. 5-14 Graf shrnující průměrnou míru snížení hmotnosti vzniklé námrazy na trolejovém drátu pro jednotlivé měřené protinámrazové směsi

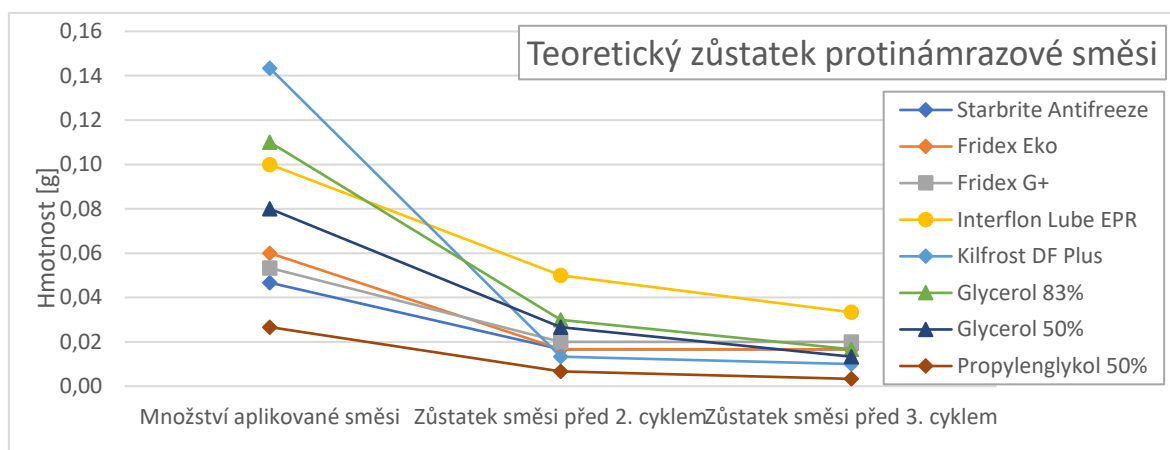


obr. 5-15 Měřicí sestava, na které probíhali experimenty s kinematikou námrazy

5.3 Výdrž ochrany vlivu směsí na vznik námrazy

Hlavní náplní tohoto experimentu bylo určení, jak dlouho dokáže protinámrazová směs mít vliv na tvorbu námrazy. Průběh experimentu byl do značné míry podobný předchozímu testování, kdy rozdílem bylo roztání námrazy a opakování experimentu. Tímto bylo cíleno na simulování skutečných podmínek, kdy přes noc je na trolejový drát aplikována protinámrazová směs, brzy ráno na něm vznikne námraza, která během dopoledne roztaje. Tento test by měl tedy odpovědět, zda bude nutné další noc na trolej protinámrazovou směs opět nanést.

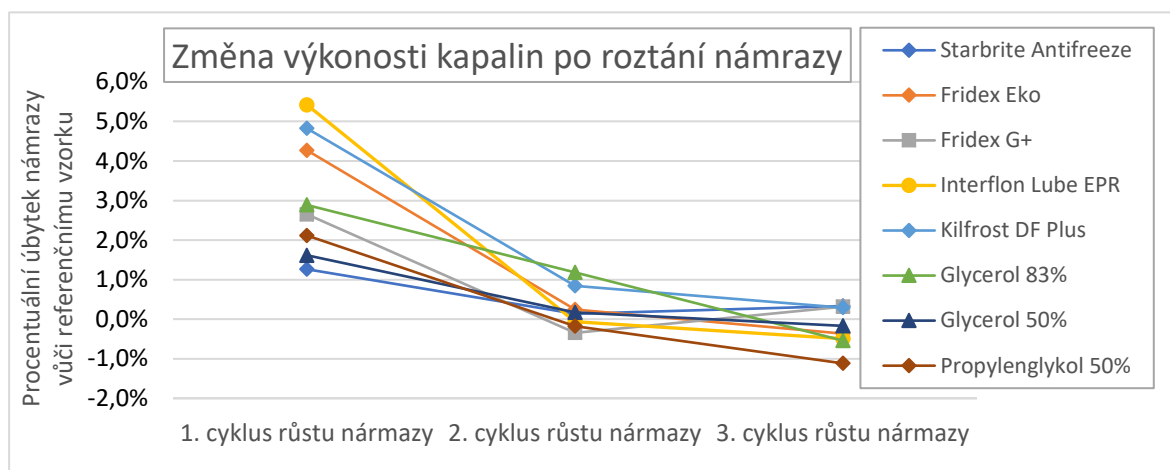
Jelikož byl průběh vzniku námrazy totožný s předchozími testy, bude zde popsáno především způsob tání námrazy. Ta probíhala na v poloze reálné orientace troleje. Nejdříve docházelo k rychlému zteplání trolejového drátu, díky její vysoké tepelné vodivosti. Od ní postupně začala tát i námraza, která poté po kusech odpadávala. Tento proces byl u vzorků s protinámrazovou směsí subjektivně o něco rychlejší. To bylo zřejmě díky rychlejšímu roztání vrstvy námrazy u povrchu troleje, kde byla stále přítomnost protinámrazové směsi. Po několika minutách v místnosti o 21 °C nebyla na povrchu troleje žádná námraza. Roztáté velké kapky vody zkapali a zbylé množství vody se z povrchu po hodině téměř odpařilo. Na povrchu zbylo jen malé množství kapaliny, která obsahuje určitou část protinámrazové směsi. Díky měření hmotnosti vzorků před i po tání námrazy bylo možné stanovit zůstatkové množství kapaliny na povrchu trolejového drátu. Průměry těchto hodnot ze všech třech měření shrnuje graf na obr. 5-16.



obr. 5-16 Množství protinámrazové směsi aplikované na vzorek trolejového drátu a zůstatkové množství kapaliny po roztání námrazy

Hodnoty zobrazené v grafu jasně ukazují, množství kapaliny, jež zůstane po roztání námrazy na vzorku, je nižší než aplikované množství protinámrazové směsi. Mírně vyrovnanější výsledky vykazuje pouze Interflon Lube EPR, a to zřejmě díky své nemísitelnosti s vodou. I přesto pro roztání námrazy je nejméně polovina aplikovaného množství směsi odplavena z povrchu trolejového drátu.

Výsledky měření shrnuje graf na obr. 2-15. Jedná se o graf interpretující vývoj vlivu směsí na tvorbu námrazy během tří námrazových cyklů. První sloupec dat fakticky reprezentuje předchozí měření. Další dva sloupce dat pak ukazují stejnou hodnotu výkonnosti směsí v ochraně proti námraze, ovšem po roztání předchozí námrazy. Pokud uvážíme, že měření přírůstku námrazy na vzorcích bez protinámrazové směsi vykazuje procentuální odchylku až 1 %. Pak měření z druhého a třetího námrazového cyklu ukazují, že rychlost růstu námrazy již protinámrazová kapalina neovlivňuje.



obr. 5-17 Graf popisující vývoj vlivu směsí na tvorbu námrazy po třech cyklech růstu námrazy, mezi nimiž byla námraza nechána roztát

Tato skutečnost byla také pozorována při fotografování růstu námrazy na vzorcích. Při druhém třetím námrazovém cyklu bylo chování vrstvy námrazy velmi shodné s referenčním vzorkem, například viz obr. 5-18 a), b). Na něm je zobrazen vzorek po 2 min růstu námrazy během třetího námrazového cyklu. Jedinou výjimku tvořila směs Inteflon Lube EPR. Ta při tání námrazy, také přišla o část své hmotnosti. Tak na povrchu troleje vznikly oblasti nepokryté touto směsí, kde se držela voda. Ta měla pravděpodobně za následek členitý povrch námrazy, viz obr. 5-18 c). Je předpoklad, že tato voda během chlazení vzorků zmrzla a vytvořila na obrázku viditelné hrudky.

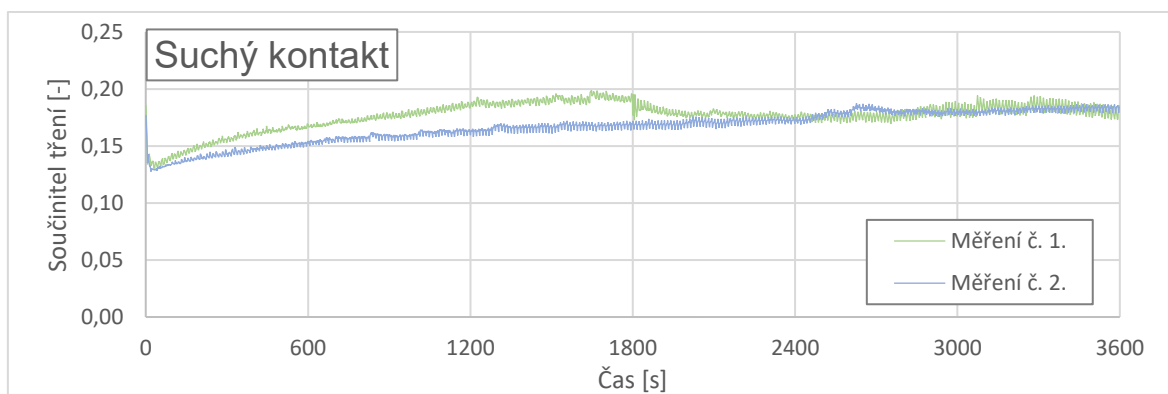


obr. 5-18 Námraza vzniklá na povrchu vzorku trolejového drátu po 2 min růstu v rámci 3. námrazového cyklu, a) vzorek bez protinámrazové směsi, b) Kilfrost DF Plus, c) Inteflon

5.4 Vliv směsí na tribologické vlastnosti kontaktu

Cílem těchto experimentů bylo zjistit vliv kapalin na chování kontaktu sběrač – trolej. Každý test probíhal 1 h a skládal se z vratného přímočarého pohybu uhlíku po vzorku měděného profilu. Během experimentu bylo měřeno veličinou především součinitel tření a jeho vývoj v čase. Měření byla realizována při vzorkovací frekvenci 1 kHz. Protože se jednalo o velké množství dat, hodnoty byly průměrovány po jedné vteřině. Dále hodnoty naměřené blízko úvrátí pohybu, kde se mění směr, byly filtrovány. Konkrétně se jednalo o filtraci na základě polohy, a to 20 % délky dráhy od každého konce. Přejezd mezi těmito koncovými úseky trvá mezi 3 a 4 sec, tudíž pro vyhodnocení byla použita právě tato data. Celkem bylo vždy během testu vykonáno 310 vratných cyklů o délce 2 x 40 mm. Dalším problémem bylo ne zcela shodná absolutní velikost třecí síly. Tedy její velikost v závislosti na směru pohybu. Protože by to vedlo ke kolísání výsledného součinitele tření, byla nula těchto hodnot posunuta do pozice střední hodnoty. Tato úprava byla provedena za předpokladu, že velikost součinitele tření není závislý na směru pohybu.

Všechny experimenty byly prováděny za standardních laboratorních podmínek při teplotě vzduchu 22 °C. První dvě měření probíhala se suchým kontaktem a jejich cílem bylo analyzovat vývoj součinitele tření a čas jeho ustálení. Zároveň mělo dojít k zaběhnutí povrchu měděné destičky. Z měření, viz obr. 5-19, se ukázalo, že pro námi zvolené experimentální podmínky, dochází k ustálení součinitele tření přibližně po 50 min testu. V případě těchto testů se součinitel tření ustálil na hodnotě 0,183 respektive 0,182 pro druhé měření.



obr. 5-19 Měření suchého kontaktu uhlíku a mědi

Další testy již proběhly s měřením úbytku hmotnosti měděného profilu, a také s měřením drsnosti opotřebovaných povrchů. Přičemž měděný profil byl mezi testy pouze čištěn, kdežto uhlíky byly pro každý test měněny. Protinámrazová směs byla do kontaktu aplikována před testem formou kapek 6 x 4 μl pomocí mikropipety. Výsledky měření jsou shrnuty v tab. 5-4. Záznamy měření součinitele tření a třecí síly formou filtrovaných grafů jsou součástí Přílohy 5.

tab. 5-4 Naměřené hodnoty součinitele tření kontaktu ovlivněného různými protinámrazovými směsmi

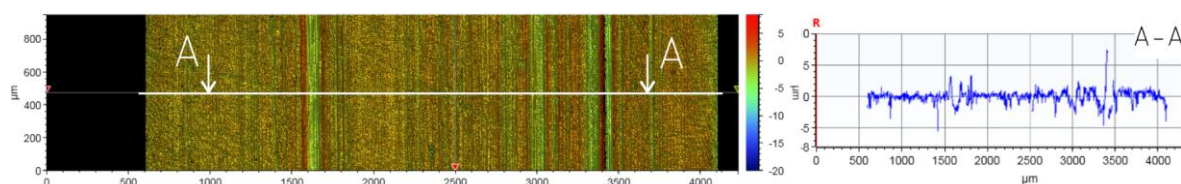
	Základová kapalina	Součinitel tření	Směrodatná odchylka		Opotřebení mědi	Drsnost Cu		Drsnost C
		[-]	[-]		[mg]	Před	Po	Po
						[μm]	[μm]	[μm]
Suchý kontakt	-	0,181	0,002	1,27%	1,8	0,377	0,436	4,114
Glycerol 83 %	Glycerol	0,159	0,002	1,14%	0,7	0,436	0,487	3,376
Glycerol 50 %	Glycerol	0,174	0,002	1,39%	0,9	0,487	0,432	2,522
Propylenglykol 50 %	Propylenglykol	0,151	0,002	1,64%	0,1	0,432	0,582	1,258
Fridex Eko	Propylenglykol	0,162	0,002	1,38%	0,2	0,582	0,566	1,495
Star Brite Antifreeze	Propylenglykol	0,168	0,003	2,00%	0,2	0,566	0,623	3,843
Kilfrost DF Plus	Propylenglykol	0,153	0,002	1,44%	0,2	0,623	0,653	4,615
Fridex G+	Ethylenglykol	0,157	0,002	1,32%	0,3	0,653	0,704	1,559
Inderflon Lube EPR	Směs olejů	0,110	0,003	3,07%	0,1	0,704	0,696	2,112

Během experimentů bylo pozorováno rozdílné chování směsí na povrchu vzorku. Extrémním případem byl Fridex G+, kde po 40 min testu nabyla kapalina v kontaktní oblasti pozorována. U ostatních směsí se na povrchu měděného vzorku tvořila hustá pasta tvořena opotřebovaným uhlíkem a ředěná zbytkem kapaliny. Výjimku tvořily směsi na bázi glycerolu, kde značné množství kapaliny pro zaplavení kontaktu vydrželo až do konce testu. Tato skutečnost však není pozorována na ovlivnění součinitelem tření. Na detailních fotografiích opotřebovaného uhlíku lze pozorovat, že na rozdíl od ostatních směsí, nedochází k zadírání mědi do povrchu uhlíku. Stopy mědi nebyly na obou vzorcích s glycerolem pozorovány. Vybrané fotografie opotřebované plochy uhlíky jsou na obr. 5-20. Ze snímků je také patrné, že skutečná styková plocha kontaktu je reálně mnohem menší. To bylo patrné způsobeno broušením uhlíků, kdy díky vysokému úběru materiálu vznikla na povrchu kulová plocha.



obr. 5-20 Pohled na opotřebovanou plochu uhlíku po testech za použití různých směsí, a) Glycerol 83 %, b) Propylenglykol 50 %, c) Interflon Lube EPR

U vzorku mědi bylo naopak pozorováno rozvoje podélných rýh, způsobených zřejmě abrazí tvrdých grafitových jader. Kromě těchto rýh spojených i se zpětným vytlačováním materiálu nedocházelo k výraznému poškození povrchu.



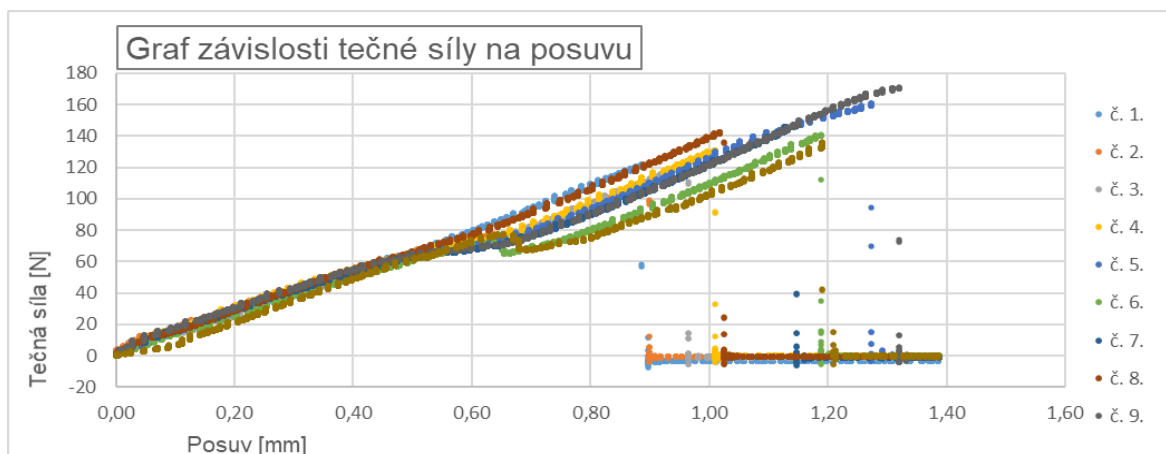
obr. 5-21 Snímek z profilometru dokumentující povrch opotřebovaného vzorku mědi s drsností R_a 0,7 μm

5.5 Vliv směsí na adhezi ledu k trolejovému drátu

V rámci experimentů bylo provedeno celkem 82 měření. Všechny testy proběhly při standartních laboratorních podmínkách, teplotě 22 °C a relativní vlhkosti 60 %. Prvních deset měření bylo pro určení adheze čistého ledu, bez použití protinámrazové směsi. Výsledky jsou shrnuty v tab. 5-5. Průměrná hodnota smykového napětí nutného k oddělení vrstvy ledu z povrchu mědi překračuje 1 MPa. Jeho výpočet byl proveden na základě maximální hodnoty tečné síly a ploše kontaktu ledu a měděné desky. Plocha kontaktu byla dána formou pro led, a ta měla velikost 99,2 mm². Při zkoušce byla také zaznamenána teplota, která se pohybovala mezi -10 až -11 °C. Záznam síly naměřené při testech jsou na obr. 5-22. Jedná se o graf popisující průběh zátěžné síly na posuvu stolu tribometru. Ačkoli je velikost deformace značná, většina připadá na protažení PMMA desky, která má výrazně nižší tuhost než blok ledu. Protože byla rychlost zatěžování konstantní, lze podobný průběh zátěžné síly očekávat i pro závislost síly na čase.

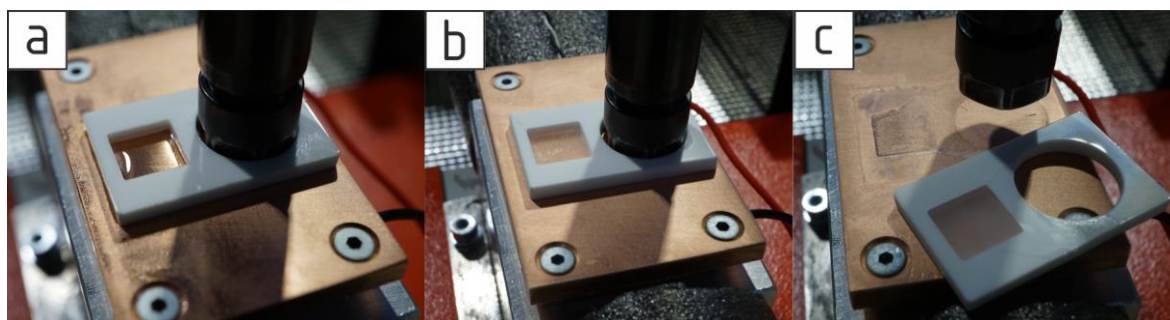
tab. 5-5 Tabulka popisující adhezi rozhraní led – měď

Adheze rozhraní led – měď					
Test č.	Množství kapaliny	Maximální tečná síla	Smykové napětí	Čas lomu	Teplota
		[N]	[kPa]	[s]	[°C]
1.	20 µl	121,6	1226,01	4,536	-10,3
2.	20 µl	110,3	1112,21	4,571	-10,1
3.	20 µl	121,8	1228,13	4,911	-10,1
4.	20 µl	131,0	1320,11	5,116	-10,1
5.	20 µl	160,7	1619,51	6,488	-11
6.	20 µl	140,8	1418,94	6,012	-10,1
7.	20 µl	146,7	1479,01	5,81	-10,1
8.	20 µl	142,6	1437,00	5,178	-10,4
9.	20 µl	170,7	1720,68	6,664	-10,2
10.	20 µl	136,2	1372,39	6,107	-10,5
Průměr		138,25	1393,40	5,54	
Odchylka		17,42	175,59	0,74	



obr. 5-22 Graf závislosti tečné síly na posunutí pro ledový kvádr na měděné desce

Na obr. 5-23 jsou vidět fotografie dokumentující test. Na posledním obrázku c) je vidět ledový kvádr s formou po odtržení. Na ploše měděné destičky, kde vznikl ledový kvádr, lze pozorovat, že měď je zcela zbavená ledu. Bohužel je také patrné, že mezi PMMA formou a měděnou destičkou byla mezera, do které zatekla voda. To i přesto, že velikost vodního sloupce byla pouhých 2,5 mm. Tato zmrzlá vrstva zůstala povrchu měděné destičky a odtrhla se naopak u rozhraní PMMA forma – led. Z toho lze usuzovat, že reálná velikost smykového napětí vedoucí k utržení ledu bude zřejmě nižší. To povvrzuje i srovnání s pracemi [63, 65], které velikost adheze stanovují pro měď mezi 0,8 až 1 MPa.



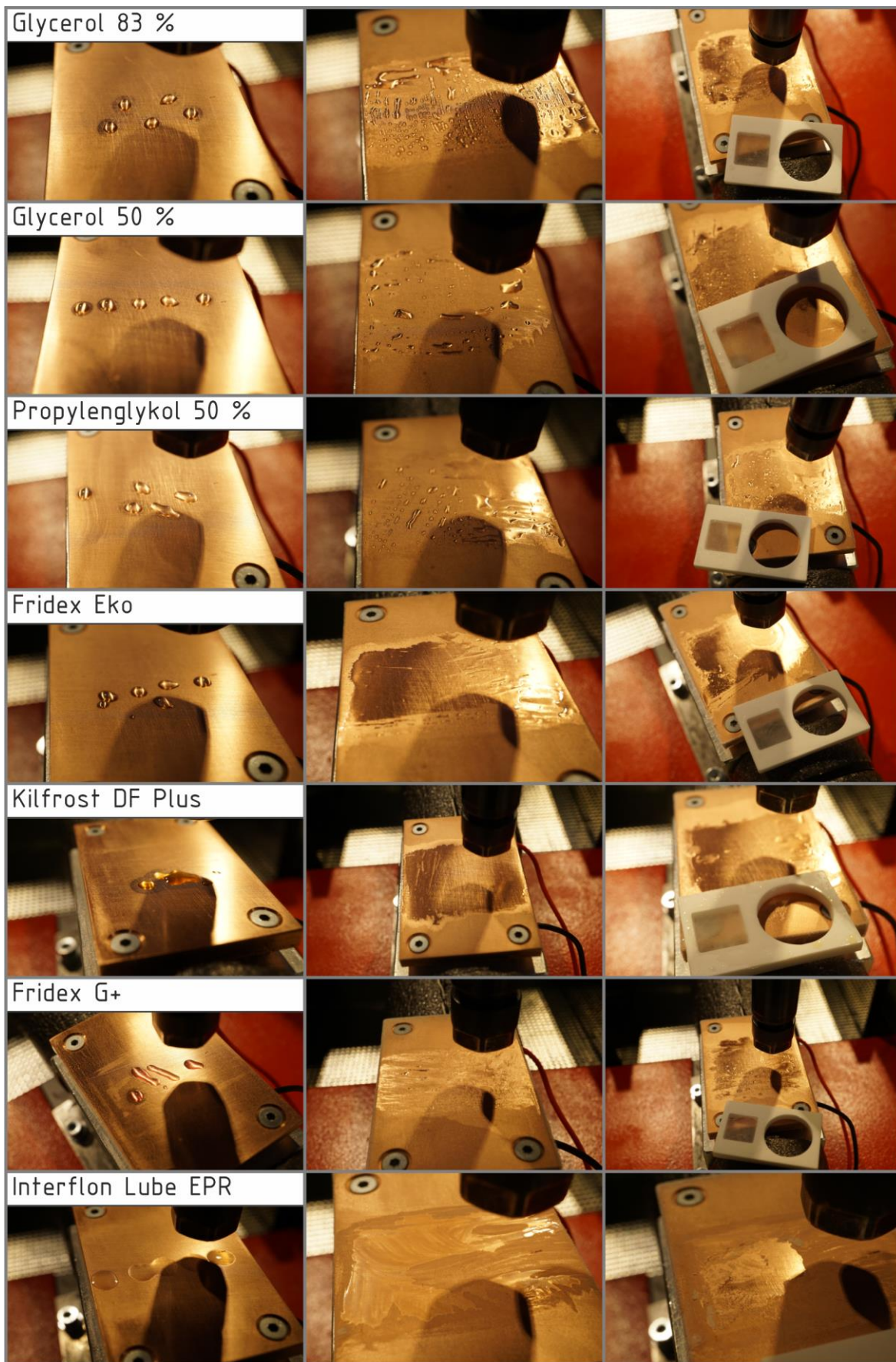
obr. 5-23 Průběh měření adheze ledu na měděné desce, a) umístění formy na led a do ní vodu, b) přeměněná voda v led, c) odtržený ledový blok

Další měření již probíhala s protinámrazovými směsmi. Ty byly dávkovány na povrch mikropipetou. Prvních sedm měření s 20 μl směsí představuje poměrně velké množství kapaliny. Jeho rozetření bylo provedeno štětcem na plochu přibližně 14 cm^2 . Pokud by došlo k rovnoměrnému rozlití kapaliny po celém povrchu, tloušťka filmu by dosahovala 14 μm . Po provedení těchto měření byla každá směs ještě dvakrát testována. A to při nižším množství aplikované směsi 2 a 10 μl . Přičemž 2 μl je minimální dávka, kterou lze pipetou provést. Pokud by opět došlo k rovnoměrnému rozlití kapaliny tloušťka filmu by byla 1,4 μm . Celkové výsledky měření jsou zobrazeny v tab. 5-6.

tab. 5-6 Výsledky měření adheze ledu k mědi, zobrazena je směrodatná odchylka z uvedeného počtu měření

	Tečná síla			Odchylka	Smykové napětí			Odchylka
	[N]	[N]	[N]	[N]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
Nic (10 měření)	138,2			17,4	1393,4			175,6
Množství kapaliny	2 μl	10 μl	20 μl (7 měření)		2 μl	10 μl	20 μl (7 měření)	
Glycerol 83 %	1,1	2,0	1,0	0,9	11,2	20,6	10,4	9,1
Glycerol 50 %	8,4	5,0	1,6	0,6	84,9	50,4	16,1	6,5
Propylenglykol 50 %	3,7	5,6	1,5	1,7	37,1	56,1	15,5	16,8
Fridex Eko	5,8	4,2	3,5	1,1	58,6	42,5	35,5	10,7
Star Brite Antifreeze	6,0	4,4	2,5	0,4	60,1	44,7	24,7	4,0
Kilfrost DF Plus	24,6	1,1	1,6	1,0	247,8	11,5	15,7	10,6
Fridex G+	3,1	2,6	3,8	0,9	31,0	26,2	37,9	8,8
Inderflon Lube EPR	13,4	3,0	1,9	0,4	135,5	30,2	19,2	3,8

Průběh experimentů je zaznamenán na obr. 4-12. Je zde především vidět ve druhém sloupci obrázků, jak rovnoměrnou vrstvu na povrchu mědi tvoří. Zejména Kilfrost a Interflon vytvoří téměř homogenní vrstvu. U Interfonu je pak problém se vznikem námrazy i na vrstvě směsi.

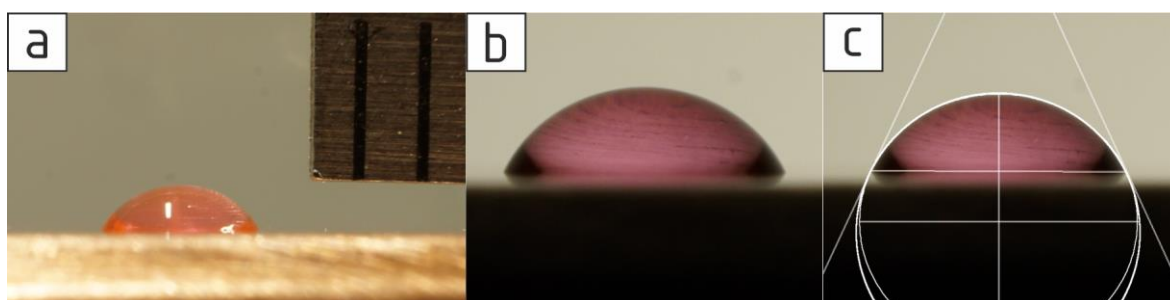


obr. 5-24 Měření vlivu směsí na adhezii ledu na povrchu mědi, fotografie zleva: nanesená směs formou pěti kapek, směs vychlazená na teplotu -10 °C, povrch měděné destičky po testu a ledový blok ve formě

5.6 Velikost kontaktního úhlu směsí

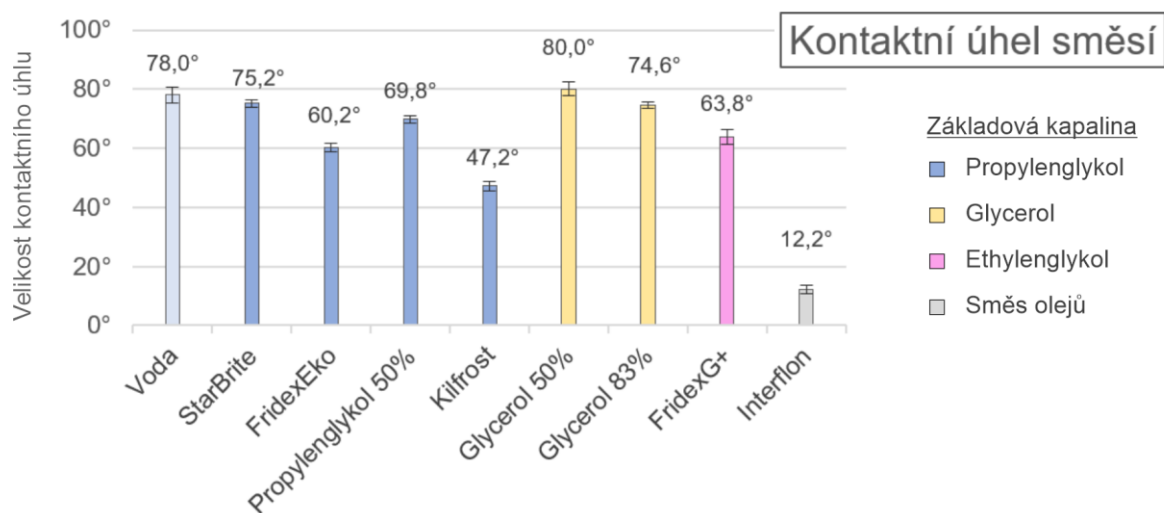
V rámci experimentu bylo pořízeno 63 fotografií kapek devíti kapalin, při standardních laboratorních podmínkách. Fotografie kapky každé směsi je součástí přílohy 2. Fotografie byly oříznuty o zbytečné okolí. U některých fotografií byl upraven kontrast pro lepší identifikaci rozhraní. Takto zpracované obrázky byly nahrány do programu ImageJ, kde pomocí modulu pro určování kontaktního úhlu byly hodnoceny. Detekce rozhraní byla prováděna ručně pomocí pěti bodů a dvou bodů ze základny kapky. Základna kapky byla na snímcích poměrně jasně zřetelná, viz obr. 5-25 b). To bylo díky mírnému naklonění povrchu měděné destičky vůči normále čipu fotoaparátu. Grafické znázornění aproximace rozhraní pomocí kružnice a elipsy vygenerované v programu je na obr. 5-25 c). Šířka základny kapek se pohybovala kolem 2,5 mm, viz obr. 5-25 a). Na snímku má kapka šířku přibližně 400 až 600 pixelů.

Výsledky měření v programu ve formě levého a pravého kontaktního úhlu z eliptické aproximace byly průměrována. Tato hodnota pak byla porovnáována s hodnotou úhlu při aproximaci kružní a rozdíl nepřesáhl 4° . Takto získaných sedm hodnot pro každou kapalinu bylo seřazeno podle velikosti a krajní hodnoty byly odstraněny. Zbýlých pět hodnot bylo aritmeticky průměrováno a byla u nich určena směrodatná odchylka.



obr. 5-25 Kapka Fidex G+ o velikosti 2 μl , a) s přiloženým pravítkem s milimetrovou stupnicí, b) fotografie kapky použítá pro obrazovou analýzu, c) grafické znázornění aproximace rozhraní pomocí kružnice a elipsy v modulu Contact Angle programu ImageJ

Grafu na obr. 5-26 shrnuje výsledky měření. Je z něj patrné, že alkoholy snižují velikost kontaktního úhlu směsí. Výjimku však tvoří glycerol, který dosahuje při koncentraci 50 % podobné velikosti kontaktního úhlu jako voda. Při vyšší koncentraci 83 % pak jeho kontaktní úhel klesá. Směsi na bázi propylenglykolu jsou na grafu seřazeny podle kontrakce alkoholu od nejnižší vlevo. Zde je také vidět klesající trend velikosti úhlu s vyšší koncentrací alkoholu, kromě čisté směsi alkoholu s vodou, který vykazuje hodnotu vyšší. Vzhledem k podobné koncentraci alkoholu s Fridexem Eko, lze konstatovat, že přísady obsažené v kapalinách mohou vést ke snížení kontaktního úhlu. Hodnoty směsi Fridex G+ s koncentrací ethylenglykol také kolem 50 % vykazuje podobné hodnoty kontaktního úhlu. Nejnižší hodnoty kontaktního úhlu dosahuje Interflon Lube EPR, což je zřejmě dáno díky jeho olejovému základu. Vzhledem k nízké velikosti kontaktnímu úhlu ho bylo problematické zaznamenávat.



obr. 5-26 Graf shrnující naměřené hodnoty kontaktního úhlu protinámrazových směsí na povrchu měděné desky

Naměřené hodnoty lze porovnat z výsledky měření provedené Kimem [45]. Ten pro 40 a 60 % směs ethylenglykolu naměřil 66° a pro stejné směsi glycerolu 77° . Na stejné aparatuře byl také proveden test, kdy na povrch měděné destičky byla kápnuta kapka $20 \mu\text{l}$ a rozetřena. Celý proces byl dokumentován a vychází z něj, že k vytvoření téměř homogenní vrstvy na povrchu dochází pouze u Interflonu a Kilfrostu. Ostatní kapaliny tvoří na povrchu kapičky. Při kapání vody na takový povrch dochází k mísení kapalin jen v omezené míře při spojování kapek. Naproti tomu u směsi Kilfrost docházelo k rozlité kapky vody do směsi a tím její zředění. U Interflonu naopak kapky vody zůstali na jeho povrchu, protože je jako jediný neředitelný vodou.

6 DISKUZE

6.1 Vliv směsí na kinematiku námrazy

Při navrhování metodologie měření kinematiky námrazy bylo uvažováno, že směsi proti námraze budou mít přímý vliv na hmotnost vzniklé námrazy. Bylo předpokládáno, že vzorky trolejového drátu bez ochrany protinámrazové směsí budou vykazovat vyššího nárůst hmotnosti námrazy. Vzhledem k přibližně ekvivalentní depozici vody na trolejový drát, bylo očekáváno, že na vzorku troleje s aplikovanou směsí námraza vůbec nevznikne a hromadí se voda bude z povrchu skapávat. Při uvažování Makkonenova modelu růstu námrazy lze tento proces popsat ovlivněním hodnoty součinitele efektivity růstu. Hodnota tohoto součinitele nabývá hodnot v intervalu mezi 0 až 1. Pro krystalickou námrazu a povrch nešetřený protinámrazovou směsí nabývá součinitel hodnoty $\alpha_3 = 1$, tak jak je uváděno v knize [2]. Při použití protinámrazové směsi je tedy očekáván jeho pokles.

Při měření přímého vlivu směsí na rychlost růstu námrazy, byl měřenou veličinou procentuální rozdíl hmotnosti mezi referenčním vzorkem a vzorkem s vrstvou protinámrazové směsi. Tento rozdíl lze pak použít pro určení korigovaného součinitele efektivity růstu pro protinámrazové kapaliny. Hodnoty korigovaného součinitele efektivity růstu jsou uvedeny v souhrnné tabulce výsledků tab. 6-1. Naměřené hodnoty ukazují, že rychlost růstu námrazy nebudou směsí výrazně ovlivňovat. To lze vysvětlit tím, že oproti původnímu předpokladu docházelo ke vzniku námrazy i na vzorku opatřeném směsí. Přesto použití směsi vedlo u všech měřených protinámrazových kapalin k redukci tohoto součinitele.

tab. 6-1 Výsledné parametry testovaných směsí

	Obsah alkoholu	Součinitel růstu – α_3	Množství dávkované směsi	Kapacita ředění směsi vodou (c_{10})	Cena aplikování směsi
		[-]	[l/km]	[g/m]	[Kč/km]
Glycerol 83 %	83 %	0,98	0,65	5,88	43
Glycerol 50 %	50 %	0,99	0,44	2,00	17
Propylenglykol 50 %	50 %	0,97	0,40	1,67	26
Fridex Eko	> 45 %	0,95	0,47	1,75	31
Star Brite Antifreeze	10 - 30 %	0,98	0,47	0,50	62
Kilfrost DF Plus	> 80 %	0,93	1,05	7,78	170
Fridex G+	40 - 50 %	0,98	0,44	1,65	35
Interflon Lube EPR	0 %	0,94	1,32	-	1723

Při depozici vody na trolejový drát dochází k jejímu míchání se směsí na bázi alkoholu. Tímto způsobem bude koncentrace alkoholu obsaženého ve směsi na povrchu troleje snižována. Protože roztok alkoholu a vody má s rostoucí koncentrací vody vyšší hodnotu tání, dochází při přílišném naředění směsi k jejímu ztuhnutí. Na základě grafu vývoje této závislosti, viz obr. 2-15, je při 10% koncentraci alkoholu teplota tání vyšší než -5 °C.

Tato hodnota je pro všechny měřené alkoholy přibližně stejná. S touto skutečností lze vypočítat, kolik vody musí na povrch trolejového drátu deponovat, aby došlo k naředění alkoholu ve směsi na hodnotu nižší než 10 %. Tyto hodnoty jsou v tab. 6-1 sloupec (c_{red}). Velikost této hodnoty je jednak závislá na koncentraci alkoholu v protinámrazové směsi, a také na jejím množství aplikovaném na trolejový drát. Vzorec pro výpočet této hodnoty pro jeden metr trolejového drátu je:

$$c_{10} = m_s(10 \cdot \%alk - 1) \quad (6-1)$$

kde:

c_{10}	maximální množství deponované vody, než dojde k růstu námrazy	[g]
m_s	množství aplikované směsi na trolejový drát	[g/m]
$\%alk$	podíl alkoholu na hmotnosti směsi	[%]

Protože při nanášení směsi na vzorek trolejového drátu byla snaha aplikovat maximální množství, pak i hodnota množství deponované vody pro zředění kapaliny vyjadřuje maximum pro danou směs. Při porovnání těchto hodnot s velikostí součinitele α_3 , tak v obou veličinách dosahuje nejlepšího výsledku Kilfrost DF Plus. Naopak ačkoli glycerol 83 % má vysokou kapacitu pro ředění vodou, vliv na součinitele α_3 je minimální. To může být způsobeno nerovnoměrným rozptřením směsi na povrchu způsobené nízkou smáčivostí kapaliny. To bylo potvrzeno měřením velikosti kontaktního úhlu. Pokud uvážíme, že během měření byla rychlost depozice vody na trolejový drát přibližně $4,1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, tak po první minutě růstu námrazy by mělo dojít u většiny směsí k naředění tolik, že začnou mrznout. Tato skutečnost byla během měření pozorována a vysvětluje tvorbu námrazy i na povrchu vzorku s protinámrazovou směsí.

V posledním sloupci tab. 6-1 je vypočtena cena směsi za aplikaci na kilometr trolejového drátu z naměřené maximální hodnoty spotřeby směsi. Do tabulky se kromě ceny promítá aplikované množství. Vzhledem ke zjištění, že větší množství aplikované směsi na trolejový drát, může prodloužit účinek zabraňující tvorbě námrazy, je vyšší aplikované množství na trolejový drát a tudíž vyšší cena opodstatněná. Diskutabilní jsou náklady za směs Interflon Lube EPR, jehož cena o řád převyšuje směsi na bázi alkoholů. Protože celkové maximální množství směsi, která je na troleji schopná ulpět, je malé, nemá význam množství aplikované směsi optimalizovat. V tomto ohledu je mnohem účinnější optimalizovat nanášecí mechanismus, tak aby co nejvyšší část směsi zůstala na trolejovém drátu.

Dlouhodobější účinek směsí na rychlost růstu námrazy sledovaly testy délky účinku ochrany směsí před vznikem námrazy, nebo též zkráceně označené jako testy výdrže. Tato měření ukázala, že po roztání námrazy na troleji s nanesenou protinámrazovou směsí, nedochází k žádnému dalšímu ovlivnění rychlosti růstu námrazy. Měření povrzuje také vývoj zůstatku kapaliny na povrchu drátu po roztání námrazy. Tato hmotnost byla nižší i než hmotnost aplikované protinámrazové směsi, a to se jedná navíc o směs značně zředěnou.

Dlouhodobý účinek směsí není ani předpokládán v případě, že k depozici vody na trolej dojde až po několika dnech. Kromě stírání kapaliny sběračem projíždějících vozidel bude značná část směsí odpařena. V tom je spatřována výhoda u Interflonu Lube EPR, který díky svému olejovému základu nebude přirozenému odpařování tolik náchylný. Z toho důvodu je uváděna účinnost komerčních směsí v řádu dní, na základě provedených měření shledána jako diskutabilní. Pro zajištění správné funkce těchto směsí na bázi alkoholu je nutné aplikovat směs každý den.

6.2 Vliv směsí na adhezi ledu

V rámci těchto experimentů byl sledován vliv směsí na přilnavost ledu k trolejovému drátu. Měření probíhalo za předpokladu, že chování rozhraní mědi a ledu bude podobné jako u námrazových jevů a ledovky. Cílem bylo zhodnotit, zda protinámrazová kapalina může snížit sílu nutnou k odstranění námrazy, tedy pokud už vznikne. V takovém případě by se smýkadlo sběrače kolejového vozidla strhávajícího námrazu nejen méně opotřebovávalo, ale mohlo by snížit množství odskoků sběrače od troleje.

Měření ukázala, že i velmi malé množství aplikované směsi může výrazně snížit velikost smykového napětí, které je nutné k oddělení ledu z povrchu troleje. Tuto skutečnost ukazuje graf na obr. 6-1. Na vodorovné ose je vynesena teoretická tloušťka vrstvy protinámrazové směsi aplikovaná na vzorek mědi. Tato hodnota by nastala pouze v případě úplného a rovnoměrného pokrytí celého povrchu, na který byla směs aplikována. Svislá osa pak představuje smykové napětí nutné k odtržení ledového bloku. Velikost napětí je vztažena k půdorysné ploše ledového bloku. Zobrazená hodnota smykového napětí s nulovou tloušťkou, pak představuje čistý led, bez použití protinámrazové směsi. K této hodnotě je vynesena směrodatná odchylka stanovená na základě měření. Ostatní hodnoty představují průměrné hodnoty všech měřených směsí, vždy pro dané aplikované množství.



obr. 6-1 Velikost adheze v závislosti na teoretické tloušťce vrstvy směsi

Hodnoty teoretické tloušťky vrstvy protinámrazové směsi na trolejovém drátu jsou zobrazeny na tab. 6-2. Pro výpočet byla použita data naměřená při nanášení směsí na trolej při testech s kinematikou námrazy. Plocha, na kterou byla vztažena tloušťka, byla stanovena jako povrch jedné poloviny pláště válce o délce 122 mm, což byla délka vzorků trolejového drátu. Velikosti tloušťky směsí jsou vyšší než 10 μm. Při porovnání těchto dat s grafem na obr. 6-1, lze předpokládat, že velikost smykového napětí nutná pro odtržení námrazy bude nižší než 50 kPa. To znamená redukci smykového napětí oproti kontaktu bez protinámrazové směsi o více než 95 %. Odstraňování námrazy z trolejového drátu však bude vyžadovat větší množství energie než z rovinné plochy, kvůli svému zaoblení. Námraza totiž trolejový drát obepíná, a proto pro její odstranění je jí nutné v některých místech rozlomit.

Při měření byla hodnocena adheze ledu vůči mědi. V reálných podmínkách ovšem na povrchu těles vzniká čistý led minimálně a skutečná námraza vykazuje dle měření [63] vyšší hodnoty adheze k povrchu mědi. Navíc skutečný trolejový drát vykazuje mnohem vyšší drsnost povrchu, navíc s četnými vadami.

tab. 6-2 Teoretická tloušťka vrstvy směsí na trolejovém drátu

Teoretická výška vrstvy směsi	
	[μm]
Glycerol 83 %	25,8
Glycerol 50 %	17,2
Propylenglykol 50 %	15,9
Fridex Eko	18,6
Star Brite Antifreeze	18,6
Kilfrost DF Plus	41,3
Fridex G+	17,2
Interflon Lube EPR	52,1

6.3 Vliv směsí na tribologické vlastnosti kontaktu

Kontakt sběrače a troleje je charakteristický svým režimem mezného mazání. Protože se jedná o otevřený tribologický systém snadno ovlivňovaný vnějšími vlivy je jeho mazání pomocí kapalin obtížné. Proto se v reálném provozu téměř nepoužívá. Pokud budou směsi proti námraze do kontaktu aplikovány budou zákonitě ovlivňovat chování kontaktu i bez přítomnosti námrazy. Proto bylo důležité u porovnávaných směsí tento vliv měřit.

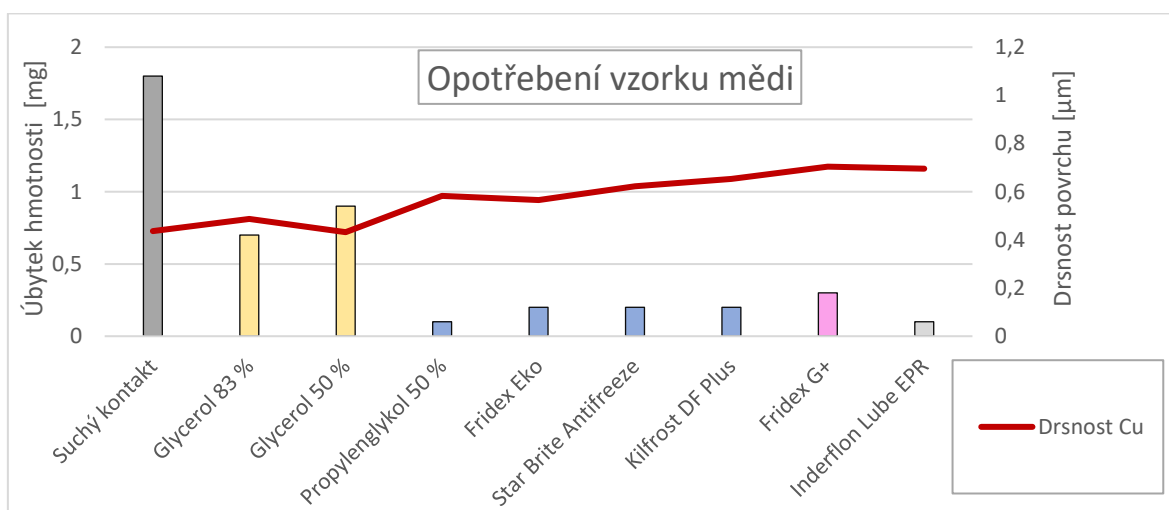
Původně bylo pro experimenty předpokládáno využití nových vzorků trolejového drátu. Identických vzorků, jaké byly použity pro měření kinematiky námrazy. Pro toto měření byla na určena normálová síla 5 N na základě ekvivalentního kontaktního tlaku. Při měření však docházelo k zadírání mědi do uhlíku a kontakt byl navíc realizován na velmi malé ploše. I z toho důvodu byla opakovatelnost malá. Dále při měření vznikala velice malá třecí síla kolem 1 N. Ta vzhledem k rozsahu snímače 60 N byla špatně zaznamenatelná a naměřená data obsahovala velký šum. Z toho důvodu bylo rozhodnuto měřit s plochým měděným profilem, tedy kontakt blízký opotřebenému trolejovému drátu. Navíc bylo možné díky geometrii kontaktu zvýšit velikost normálové síly na 15 N.

Zároveň byly testy koncipovány jako časově delší se záběhem. To proto, že pokud je test složen pouze z jediného posuvu tam a zpět, naměřené hodnoty by byly značně nahodilé. Což bylo také zkoušeno. To bylo zřejmě způsobeno nerovnoměrnou morfologií povrchu, zejména uhlíku, díky jeho ručnímu broušení. Při nakonec realizovaných hodinu trvajících testech již bylo vidět určité ustálení vývoje součinitele tření.

Hodnoty součinitele tření suchého kontaktu se ustálily na 0,18. Naměřená data ukazují, že všechny směsi proti námraze vedly u kontaktu ke snížení součinitele tření. Pokles hodnoty součinitele tření se u směsí na alkoholové bázi pohyboval do 20 %. Výraznější propad součinitele tření vykazoval Inteflon Lube EPR, který je na olejové bázi. Ten dosahoval snížení součinitele tření o 39 % oproti suchému kontaktu. Také jako jediná směs vykazovala mírně negativní trend ve vývoji součinitele tření. To bylo určeno na základě analýzy dat z celého měření pomocí lineární regrese.

Chování směsí u reálného kontaktu může být mírně odlišné. Hlavními rozdíly v metodice měření byla absence laterální rychlosti a proud procházející kontaktem. Další rozdíly jsou spatřovány v nezohlednění dynamiky systému. Tedy faktu, že u reálného kolejového vozidla se velikost přítláčné síly výrazně kolísá až do trojnásobku své statické hodnoty.

Výsledky měření opotřebení je graficky zobrazeno na obr. 6-2. Graf zobrazuje úbytek hmotnosti vzorku mědi. Na pomocné ose je vynesena drsnost povrchu, měřená pokaždé na identickém místě. Během měření byl povrch mědi pouze čištěn. Použitá váha má přesnost na jednotky miligramů. Přesto dokáže měřit na desetiny miligramu, přičemž výrobce udává opakovatelnost 0,3 mg. Velikost opotřebení u suchého kontaktu byla naměřena 1,8 mg. U všech měřených směsí bylo sledováno nižší velikost opotřebení měděného vzorku. Přestože jsou směsi seřazeny podle toho, jak byly testovány, nelze považovat měření suchého kontaktu jako záběh vzorku mědi. Měření totiž předcházely ještě dva testy suchého kontaktu se stejnou metodologií, pouze u nich hmotnost a drsnost nebyla měřena. V grafu lze pozorovat mírně vyšší hodnotu opotřebení pro glycerol. To lze přičítat rozdílným stavům povrchu opotřebovaného uhlíku po testu. Na rozdíl od ostatních měření na něm nebyla pozorována stopa otřené mědi. To mohlo vést na vyšší míru abrazivního opotřebení, a tudíž i větší opotřebení.



obr. 6-2 Opotřebení vzorku mědi představující opotřebovaný trolejový drát

7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá zkoumáním směsí proti tvorbě námrazy na trolejových vedení. Na tento problém lze nahlížet jak z perspektivy tribologie kontaktu sběrače a troleje, tak ve vztahu kinematiky růstu námrazy. Z toho důvodu se i řešerše zabývá různými odvětvími poznání. Byly zkoumány metody odstranění námrazy z trolejového vedení a jejich ochrana před ní. Vlastnosti interagujících těles v tribologickém kontaktu, a také jejich chování. Byly popisovány směsi proti námraze a alkoholy, ze kterých jsou tyto směsi namíchány. A pak také námrazové jevy a jejich vznik včetně způsobu jejich zkoumání v laboratorních podmínkách.

Na základě této obsáhlé řešerše byla zpracována metodika měření. Měření byla rozdělena na testy vlivu směsí na kinematiku růstu námrazy a na testy vlivu směsí na tribologické vlastnosti kontaktu. Vzhledem k absenci testovacího zařízení pro zkoumání kinematiky námrazy, bylo takové v rámci této práce zkonstruováno. Jedná se o zařízení v podobě klimatického tunelu s uzavřeným nuceným oběhem vzduchu. V tomto zařízení lze docílit vzniku všech typů námrazových jevů. V tomto zařízení byly také vybrané směsi testovány na jejich vliv na růst námrazy. Tribologické testy byly prováděny na tribometru, který bylo nutné doplnit o modul, který testy s vzorkem trolejového drátu umožňoval. V rámci řešení práce vzniklo několik hypotéz, které byly ověřovány v rámci dalších doplňkových měření. Bylo to měření kontaktního úhlu směsí na povrchu mědi. A také měření adheze ledu k povrchu mědi, při použití protinámrazových směsí.

Výsledky měření ukazují, že směsi proti námraze snižují rychlost růstu námrazy a v případě jejího vzniku umožňují její snadnější odstranění z povrchu troleje. Zároveň tyto směsi negativně neovlivňují tribologické chování sběrač-trolej a mohou vést ke snížení opotřebení.

Jako optimální se z pohledu práce jeví kapalina s vysokým obsahem propylenglykolu a přísady pro lepší nanášení a lpění na povrchu. Tedy přísady pro snížení povrchového napětí, které zlepšují smáčivost povrchu, případně zahušťovadla pro zvýšení viskozity kapaliny a přísady měnící chování kapaliny na pseudoklasické s mezí toku. Kapaliny s těmito vlastnostmi by mohla zabránit vzniku námrazy nejen při jejím růstu ze vzdušné vlhkosti, ale i v případě vyšší depozice vysrážené vody. Chování těchto kapalin z tribologického hlediska by pak bylo vhodné zkoumat při zohlednění vlivu elektrického proudu procházejícího kontaktem. Kapaliny by totiž mohly mít vliv na velikost přechodového odporu v kontaktu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] TOPIČ, Petr. Česko přes noc pokryla ledovka. In: *IDnes: Zprávy* [online]. Praha: Mafra, 2019, 2014 [cit. 2019-06-09]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/zpravy/domaci/drahy-doprava-kalamita-ledovka-pocasi.A141202_160115_domaci_hv/foto/ZT57a28c_082045_4600587.jpg
- [2] FARZANEH, M. *Atmospheric icing of power networks*. [London]: Springer, c2008. ISBN 14-020-8530-3.
- [3] ER, Ümit a Fatih Hayati ÇAKIR. Urban Light Rail Transportation Systems Catenary Line Anti-Icing Applications, Laboratory and Field Tests. *Anadolu University Journal of Science and Technology-A Applied Sciences and Engineering*. 2018, roč. 19, č. 2, s. 433–442. ISSN 1302-3160.
- [4] Brněnská služební tramvaj T3M. *Československý dopravák*. Ostrava: MH Development, 2002, 2018(5), s. 67-72. ISSN 1804-2309. [5] Jak šel čas kolem výtahů na můstku zastávkový příběh jak z akčního filmu k čemu druhý pantograf ? 2016.
- [6] LAFORTE, J. L., M. A. Allaire A J. Laflamme. State-of-the-art on power line de-icing. *Atmospheric Research*. 1998, roč. 46, č. 1–2, s. 143–158. ISSN 01698095.
- [7] GUO, Lei, Xiaojie GAO, Qunzhan LI, Wenxun HUANG a Zeliang SHU. Online antiicing technique for the catenary of the high-speed electric railway. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015, roč. 30, č. 3, s. 1569–1576. ISSN 08858977.
- [8] HÁNYŠ, Rostislav. Horská trať testuje odmrazování trolejí. Může odolat ledové kalamitě. In: *IDnes: Zprávy* [online]. Praha: Mafra, 2019, 2018 [cit. 2019-06-09]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/olomouc/zpravy/odmrazovani-troleji-zeleznice-desna-drazni-urad-szdc-kalamita-led.A180327_391991_olomouc-zpravy_mip
- [9] VAŠÍČEK, Jaroslav. Sběrač proudu k napájení trolejbusu. 2015. Česká republika. CZ307937B6. Uděleno 25.07.2019. Zapsáno 24.07.2015.
- [10] HARA, Yasuzo. Antifreezing agent coating device for trolley wire. 1984. Japonsko. JPS6167637A. Zapsáno 9.11.1984.
- [11] 邓韬林建辉. *Moist antifreezing solution smearing device*. 2013. Čína. CN103447192A CN. Přihlášeno 30.9.2013. Uděleno 9.9.2015. Zapsáno 18.12.2013.
- [12] BREMER STRABENBAHN AG. *Deicing unit for overhead wires for an electrically driven vehicle and such a vehicle has carrier to coat the wire with glycerol*. 2004. Německo. DE202004008632 German Patent. Přihlášeno 8.12.2004. Zapsáno 1.6.2004
- [13] Non-Icing-System. In: *STEMMANN-TECHNIK: A Wabtec Company* [online]. Schüttorf: STEMMANN-TECHNIK, 2015 [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: http://www.stemmann.com/documents/catalogues/ST_NIS-Non-Icing-System_ENG.pdf

- [14] STEMMANN-TECHNIK. *NIS non-icing-system*. Presentace firmy Stemmann-technik Dostupné z: <https://docplayer.cz/110707340-Stemmann-technik-nis-non-icing-system-preventivni-system-proti-namrzani-troleje.html>
- [15] SYLVAIN DELLSPERGERUWE VOLLRATH. *Device for applying a deicing means to an overhead line and use of such a device*. 2015. Německo. WO2016020301A1 WO. Přihlášeno 5.8.2014. Uděleno 11.2.2016. Zapsáno 31.7.2015.
- [16] *Device for applying a deicing means to an overhead line and use of such a device*. 2014. Německo. WO/2016/020301. Uděleno 11.02.2016. Zapsáno 05.08.2014.
- [17] *ProFil 3V Contact wire de-icing technology*. Kummmler + Matter. 2017. Produktový katalog
- [18] FAUSTO, Odorici. DIPSA TECHNES. *Device for dispensing an anti-ice and/or anti-wear fluid on a cable for the transmission of electric current and/or for evaluating the wear of a cable*. 2019. Itálie. EP3511200 (A1). Zapsáno 17.7.2019.
- [19] *FroSTOP. DIPSA*. 2018. Produktový katalog
- [20] MULLER, M ; MULLER, Z ; TLUSTY, J. Dynamic Behaviour of Overhead Line under Icing Conditions. In: . 2015 [vid. 21. březen 2019].
- [21] HEYUN, Liu, Gu XIAOSONG a Tang WENBI. Icing and Anti-Icing of Railway Contact Wires. *Reliability and Safety in Railway*. 2012. ISSN 00189278.
- [22] KUBÁT, Bohumil. *Městská a příměstská kolejová doprava*. B.m.: Wolters Kluwer Česká republika, 2010. ISBN 9788073575397.
- [23] WU, Jiqin. Material Interface of Pantograph and Contact Line. *Pantograph and Contact Line System*. 2018, s. 165–191.
- [24] ČSN EN 50367. *Drážní zařízení - Systémy sběračů proudu: Technická kritéria pro interakci mezi pantografovým sběračem a trolejovým vedením (pro dosažení volného přístupu)*. Ed. 2. Brusel: CENELEC, 2012.
- [25] Close-up photographs of rime. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-06-09]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Close-up_photographs_of_rime
- [26] T24. *Údržba a opravy pantografových sběračů proudu: Hodnoty nastavení a seřízení sběrače*. Revize 2. Brno: Dopravní podnik města Brna, 2011.
- [27] ČSN EN 50206-1. *Drážní zařízení - Kolejová vozidla: Pantografové sběrače: Vlastnosti a zkoušky – Část 1: Pantografové sběrače proudu vozidel pro tratě celostátní*. Edice 2. Praha: ACRI, 2001.
- [28] SVOBODA, Jiří, 1946-. *Trakční vedení ; Jiří Svoboda a kolektiv*. 1. vydání. B.m.: Nakladatelství dopravy a spojů, 1979 [vid. 24. březen 2019].
- [29] ČSN EN 50149. *Drážní zařízení: Pevná drážní zařízení: Elektrická trakce: Profilový trolejový vodič z mědi a slitin mědi*. 2. vyd. Praha: ACRI, 2012.
- [30] *E10: Předpis pro provoz, obsluhu a údržbu trakčního vedení*. Praha: SŽDC, 2011.
- [31] HE, Da Hai, Rafael R. MANORY a Norm GRADY. Wear of railway contact wires against current collector materials. *Wear*. 1998, roč. 215, č. 1–2, s. 146–155. ISSN 00431648.

- [32] HE, Da Hai, Rafael MANORY a Harry SINKIS. A sliding wear tester for overhead wires and current collectors in light rail systems. *Wear*. 2000, roč. 239, č. 1, s. 10–20. ISSN 00431648.
- [33] F.OKIMOTO, S.KUSUMI, H.Nagasawa. A Study on Reducing Wear of Contact Wire at Stations of High Speed Line by Using Wear Map of Wire. nedatováno.
- [34] BUCCA, Giuseppe a Andrea COLLINA. A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph-catenary system. *Wear*. 2009, roč. 266, č. 1–2, s. 46–59. ISSN 00431648.
- [35] DING, T., G. X. CHEN, J. BU a W. H. ZHANG. Effect of temperature and arc discharge on friction and wear behaviours of carbon strip/copper contact wire in pantograph-catenary systems. *Wear*. 2011, roč. 271, č. 9–10, s. 1629–1636. ISSN 00431648.
- [36] ZHANG, Y. Y., Y. Z. ZHANG, S. M. DU, C. F. SONG, Z. H. YANG a B. SHANGGUAN. Tribological properties of pure carbon strip affected by dynamic contact force during current-carrying sliding. *Tribology International*. 2018, roč. 123, č. December 2017, s. 256–265. ISSN 0301679X.
- [37] SENOUCI, A., J. FRENE a H. ZAIDI. Wear mechanism in graphite-copper electrical sliding contact. *Wear*. 1999, roč. 225–229, č. PART II, s. 949–953. ISSN 00431648.
- [38] DOW. A Guide To Glycols. *A guide to Good Research Practice*. 2003, s. 1–35.
- [39] SPANGLER, John A. a Earl C.H. DAVIES. Freezing Points, Densities, and Refractive Indexes of the System Glycerol-Ethylene Glycol-Water. *Industrial and Engineering Chemistry - Analytical Edition*. 1943, roč. 15, č. 2, s. 96–99. ISSN 00964484.
- [40] SKOLIL, J. *Fyzikálně-chemické aspekty ekologických teplonosných kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2016. 141 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Josef Čáslavský, CSc.
- [41] *ISO 11075:2007: Aircraft — De-icing/anti-icing fluids — ISO type I*. Druhé. AEA, SAE, 2007.
- [42] *ISO 11078:2007: Aircraft — De-icing/anti-icing fluids — ISO types II, III and IV*. Druhé. AEA, SAE, 2007.
- [43] Smékal, A. *Odmrazovací soustavy letadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 39 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Karel Třetina, CSc.
- [44] BETTEZ, Maxime. *Winter Technologies for High Speed Rail*. Trondheim, 2011. Master thesis. Norwegian University of Science and Technology Faculty.
- [45] KIM, et al. *Surface Characterizations of Railway Electrical Wires Coated with Anti-Icing Mixtures of Ethylene Glycol or Glycerol with Tap Water*. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2019, roč. 19, č. 3, s. 1269–1275 [vid. 26. březen 2019]. ISSN 1533-4880.
- [46] IGRALUB. *Contact wire de-icing*. 2019. Produktový katalog
- [47] KIFROST. *Kifrost Rail*. [vid. 24. březen 2019]. Dostupné z: <https://www.kilfrost.com/products/winter-deicing-products-aircraft-aviation-rail/rail-deicing-fluids/3rd-rail.html>

- [48] *SNCF to use Kilfrost Rail Plus anti-icing product on TGV trains*. [vid. 17. prosinec 2019]. Dostupné z: <https://www.railway-technology.com/uncategorised/newssncf-kilfrost-rail-plus-tgv-trains/>
- [49] INTERFLON. *Inteflon Lube EPR*. 2019. Produktový katalog
- [50] VELVANA. *Fridex Eko*. In: *OMA CZ* [online]. Stráž pod Ralskem: OMA CZ, 2019 [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: www.omacz.cz/cs/produkty/800-velvana-fridex-eko
- [51] *Zpravodaj: Dopravní podnik města Brna, a. s.* 2016. Brno: Dopravní podnik města Brna.
- [52] *Zpravodaj: Dopravního podniku Ostrava*. 2018. Ostrava: Dopravního podnik Ostrava
- [53] BEDNÁŘ, Jan, Czech Republic. MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. a ČESKOSLOVENSKÁ METEOROLOGICKÁ SPOLEČNOST. *Meteorologický slovník výkladový terminologický: s cizojazyčnými názvy hesel ve slovenštině, angličtině, němčině, francouzštině a ruštině*. 1. vyd. B.m.: Ministerstvo životního prostředí ČR, 1993 [vid. 20. březen 2019]. ISBN 8085368455.
- [54] ČESKÁ METEOROLOGICKÁ SPOLEČNOST. *Meteorologický slovník*. [vid. 20. březen 2019]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/>
- [55] ŠKODNÁ, Eliška. *Výskyt mlh a námraz v ČR: územní variabilita a časový trend*. Praha, 2009. Bakalářská práce. Univerzita Karlova. Vedoucí práce Iva Hůnová.
- [56] VRÁNA, Josef, meteorolog. *Námraza a její předpověď: námrazové kalamity v energetice na území ČSR /*. 1. vyd. B.m.: Český hydrometeorologický ústav, 1986 [vid. 20. březen 2019]. Práce a studie (Český hydrometeorologický ústav).
- [57] Vysočinu obalila silná námraza. In: *InMeteo* [online]. Plzeň: InMeteo, 2013, 23.12.2016 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://www.inmeteo.cz/clanky/?clanek=namraza-vysocina-23.12.2016>
- [58] *Síla a krásy námrazy* [online]. In: . [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://www.chmuul.org/aktuality/2014-02-06-namraza/>
- [59] Námrazové jevy. *portal.chmi.cz*. 2019 [vid. 17. prosinec 2019]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/vystrahy/napoveda/namrazy.html>
- [60] ČSN ISO 12494 (730034). *Zatížení konstrukcí námrazou*. Praha.
- [61] DALLE, Bernard a Pierre ADMIRAT. Wet snow accretion on overhead lines with French report of experience. *Cold Regions Science and Technology*. 2011. ISSN 0165232X.
- [62] VAN ZANTE, Judith, Robert IDE a Laura-Cheri STEEN. NASA Glenn Icing Research Tunnel: 2012 Cloud Calibration Procedure and Results. 2012, č. May 2015.
- [63] WORK, Andrew a Yongsheng LIAN. A critical review of the measurement of ice adhesion to solid substrates. *Progress in Aerospace Sciences*. 2018, roč. 98, č. March, s. 1–26. ISSN 03760421.
- [64] RØNNEBERG, Sigrid, Caroline LAFORTE, Christophe VOLAT, Jianying HE a Zhiliang ZHANG. The effect of ice type on ice adhesion. *AIP Advances*. 2019, roč. 9, č. 5. ISSN 21583226.

- [65] DOU, Renmei, Jing CHEN, Yifan ZHANG, Xupeng WANG, Dapeng CUI, Yanlin SONG, Lei JIANG a Jianjun WANG. Anti-icing coating with an aqueous lubricating layer. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2014, roč. 6, č. 10, s. 6998–7003. ISSN 19448252.
- [66] RTEC.R. *Rtec Universal Tribometer*. 2019. Produktový katalog
- [68] THERMO HAAKE. *Instruction Manual including all Baths*. 2002. Návod na obsluhu
- [69] *Properties: Carbon - Graphite Materials*. [vid. 18. listopad 2019]. Dostupné z: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=516>
- [70] IMAGEJ. *Contact Angle*. [vid. 21. červen 2020]. Dostupné z: <https://imagej.nih.gov/ij/plugins/contact-angle.html>
- [71] SPRAYING SYSTEM. *Automatic & air atomizing spray nozzles*. Katalog produktů
- [72] MAXIM INTEGRATED. *DS18S20 High-Precision 1-Wire Digital Thermometer*. Datasheed
- [73] *Teploměr a vlhkoměr DHT11 a DHT22 | Arduino návody*. [vid. 18. listopad 2019]. Dostupné z: <https://navody.arduino-shop.cz/navody-k-produktum/teplotni-senzor-dht11.html>

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 1-1	Pantografický sběrač proudu tramvaje	15
obr. 2-1	Možnosti odstranění a ochrany trolejového vedení před námrazou	16
obr. 2-2	Skládaná kompozitní smýkadla	17
obr. 2-3	Systém proti námraze NIS od Stemmann-Technik	19
obr. 2-4	Sběrač vybavený soustavou trysek pro nanášení směsi proti námraze a	19
obr. 2-5	Nanášecí zařízení od společnosti <i>Dipsa Technes</i>	20
obr. 2-6	Rizika vzniku námrazy na troleji	21
obr. 2-7	Sběrač pantografového typu - terminologie	22
obr. 2-8	Průřez trolejového drátu	23
obr. 2-9	Síly a rychlosti působící v kontaktu sběrač-trolej	23
obr. 2-10	Míra opotřebení trolejového drátu	25
obr. 2-11	Schéma testovacího pro kontakt sběrač-trolej	26
obr. 2-12	Výsledky míry opotřebení	27
obr. 2-13	Závislost součinitele tření na teplotě kontaktu a velikosti elektrického	27
obr. 2-14 a)	Teplota tuhnutí směsi glycerolu s vodou	29
obr. 2-15	Hodnoty teploty tání t_T [°C] a dynamické viskozity η [mPa·s]	30
obr. 2-16	Zařízení pro odstranění námrazy v Dramen	31
obr. 2-17	Hmotnostní změna velikosti námrazy	32
obr. 2-18	Vzhled námrazků	36
obr. 2-19	Grafické znázornění mechanismů vzniku námrazy	38
obr. 2-20 a)	Závislost druhů námrazy na teplotě vzduchu a rychlosti větru	39
obr. 2-21 a)	Schéma testovací komory	41
obr. 2-22 a)	Graf nárůstu hmotnosti námrazy v čase	42
obr. 2-23	Ishiuchi wind tunnel	43
obr. 2-24	Schéma zařízení pro výzkum námrazy	43
obr. 2-25	Rotační odstředivé zařízení pro testování adheze	44
obr. 2-26	Měření adheze ledu k různým materiálům	45
obr. 3-1	Otevřený tribologický systém popisující kontakt sběrač-trolej	47

obr. 3-2 Vlivy ovlivňující vznik a rychlost růstu námrazových jevů	48
obr. 3-3 Tabulka směsí proti námraze používaných v kolejové dopravě	50
obr. 4-1 Diagram znázorňující postup práce	53
obr. 4-2 Směsi použité pro testy v rámci této práce	54
obr. 4-3 Vzorčky trolejového drátu	55
obr. 4-4 Uhlíkové fragmenty smýkadla sběrače	56
obr. 4-5 Schéma zařízení pro studium kinematiky námrazy	56
obr. 4-6 Univerzální tribometr Rtec s klimatickou komorou	57
obr. 4-7 Modul pro tribometr Rtec	58
obr. 4-8 Aparatura pro měření kontaktního úhlu	59
obr. 4-9 Diagram postupu měření vlivu kapalin na kinematiku námrazy	60
obr. 4-10 Místo aplikace protinámrazové směsi na trolejový drát	61
obr. 4-11 Diagram průběhu námrazového cyklu 3 x 1 min a experimentální podmínky	61
obr. 4-12 Diagram znázorňující postup měření délky účinku vlivu směsí	62
obr. 4-13 a) průřez stykem nového trolejového drátu a sběrače	64
obr. 4-14 Diagram postupu měření adheze ledu na tribometru a podmínky experimentu	66
obr. 5-1 Konceptní řešení testovacího zařízení	67
obr. 5-2 Schéma zapojení ventilátoru	68
obr. 5-3 Tryska SU1A	69
obr. 5-4 Pneumatický a hydraulický okruh zařízení pro tvorbu námrazy	70
obr. 5-5 Graf závislosti povrchová teploty kapiček v čase	72
obr. 5-6 Zapojení měřícího řetězce	73
obr. 5-7 Finální návrh testovacího zařízení pro tvorbu námrazy	74
obr. 5-8 Vyrobené testovací zařízení	74
obr. 5-9 Námrazové jevy vzniklé v testovacím zařízení	75
obr. 5-10 Zařízení před a po testu námrazy	75
obr. 5-11 Forma nánosu směsi na povrchu trolejovém drátu	76
obr. 5-12 Graf popisující množství aplikované směsi na povrch trolejového drátu	76
obr. 5-13 Diagram popisující rozdílný růst námrazy na trolejovém drátu	77
obr. 5-14 Graf shrnující průměrnou míru snížení hmotnosti vzniklé námrazy	78

obr. 5-15 Měřicí sestava, na které probíhali experimenty s kinematikou námrazy	78
obr. 5-16 Množství protinámrazové směsi aplikované na vzorek	79
obr. 5-17 Graf popisující vývoj vlivu směsí na tvorbu námrazy	80
obr. 5-18 Námraza vzniklá na povrchu vzorku trolejového drátu	80
obr. 5-19 Měření suchého kontaktu uhlíku a mědi	81
obr. 5-20 Pohled na opotřebenou plochu uhlíku po testech	82
obr. 5-21 Snímek z profilometru dokumentující povrch opotřebeného vzorku mědi	82
obr. 5-22 Graf závislosti tečné síly na posunutí pro ledový kvádr na měděné desce	83
obr. 5-23 Průběh měření adheze ledu na měděné desce	84
obr. 5-24 Měření vlivu směsí na adhezi ledu na povrchu mědi	85
obr. 5-25 Kapka Fidex G+ o velikosti 2 μ l	86
obr. 5-26 Graf shrnující naměřené hodnoty kontaktního úhlu směsí	87
obr. 6-1 Velikost adheze v závislosti na teoretické tloušťce vrstvy směsi	91
obr. 6-2 Opotřebený vzorek mědi představující opotřebovaný trolejový drát	93

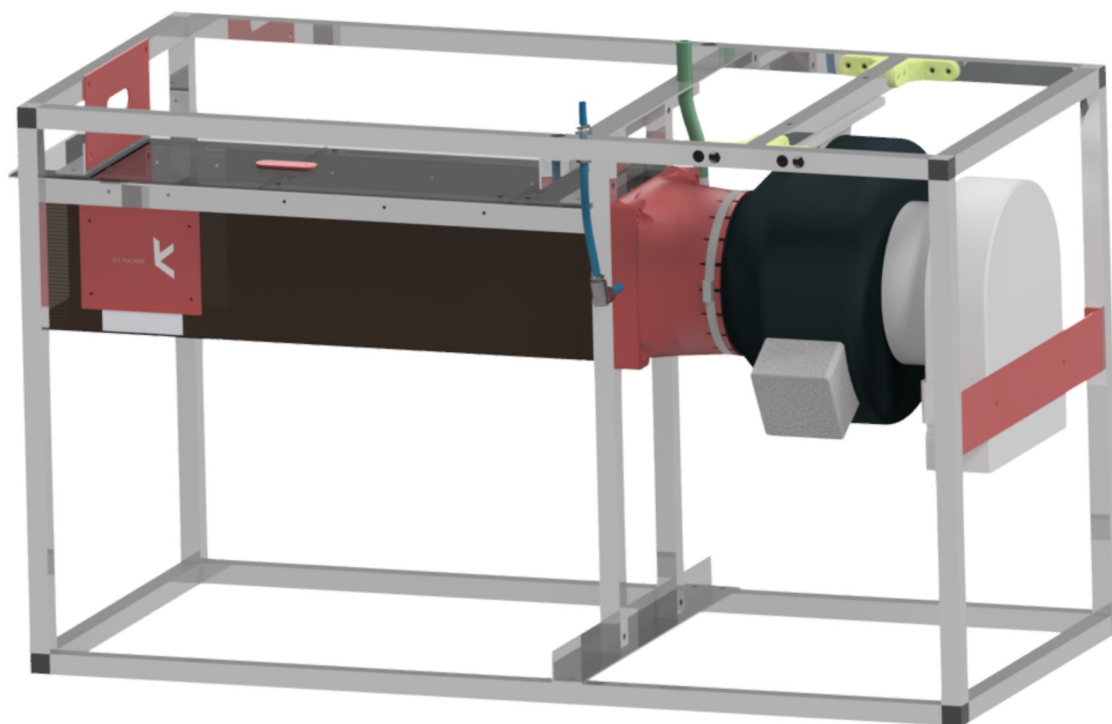
10 SEZNAM TABULEK

tab. 2-1 Porovnání energetické náročnosti odstranění námrazy z vodiče	18
tab. 2-2 Materiály trolejového drátu	25
tab. 2-3 Parametry neředěných alkoholů používaných pro de-icing a anti-icing aplikace	29
tab. 2-4 Hodnoty spotových cen glycerolu, propylenglykolu a etylenglykolu	30
tab. 2-5 Tabulka typů námrazových jev	35
tab. 2-6 Tabulka velikosti kapalných částic při různých meteorologických jevech	37
tab. 3-1 Charakteristiky výstupů práce	51
tab. 4-1 Tabulka směsí použitých k testování v této práci	54
tab. 5-1 Parametry trysky SU1A	69
tab. 5-2 Tabulka tepelných ztrát v potrubí vedoucí vodu k trysce	71
tab. 5-3 Tabulka ochlazení kapičky vody o různém průměru	71
tab. 5-4 Naměřené hodnoty součinitele tření kontaktu	82
tab. 5-5 Tabulka popisující adhezi rozhraní led – měď	83
tab. 5-6 Výsledky měření adheze ledu k mědi	84
tab. 6-1 Výsledné parametry testovaných směsí	88
tab. 6-2 Teoretická tloušťka vrstvy směsí na trolejovém drátu	91

11 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Dokument o funkčním vzorku
- Příloha 2 Konstrukce modulu pro tribometr
- Příloha 3 Kinematika námrazy na trolejovém drátu ve fotografiích
- Příloha 4 Fotografie kapky použité pro určení kontaktního úhlu směsí
- Příloha 5 Výsledky měření kontaktu sběrač trolej na tribometru

Experimentální zařízení pro studium námrazových jevů trolejových vedení



Apollo ID: 161652

Datum: 29.1.2020

Typ projektu: G - funkční vzorek

Autoři: MÁLEK, J.; GALAS, R.; OMASTA, M.; HARTL, M.; ROSENDORF, P.;
VAŠÍČEK, M.

Technický popis:

Experimentální zařízení umožňuje studovat proces tvorby námrazy na vzorcích trolejových vedení a stanovit tribologické vlastnosti kontaktu mezi sběračem a trolejí při aplikaci směsí proti tvorbě námrazy. Zařízení využívá vzorky reálné troleje. Součástí zařízení je klimatická komora uzpůsobená pro simulaci vzniku různých námrazových jevů. Součástí zařízení je dále modul tribometru s komorou pro testy tření a opotřebení kontaktu troleje a sběrače.

Základní technické parametry

Zařízení se skládá s uzavřeného větrného tunelu s nucenou cirkulací vzduchu. Do proudu vzduchu je v něm rozprašována voda pomocí dvoumédiové trysky a tato směs vzduchu prochází kolem vzorků třech vzorků trolejového drátu o délce 120 mm. Celé zařízení je umístěno v chladicí komoře. Součástí je modul tribometru.

Základní technické parametry:

- Rychlost proudění 2 – 8 m/s
- Přívod vody tryskou až 2 l/h
- Teplota až - 27 °C
- Počet zkušebních vzorků – 3 ks

Využití výsledku dle smlouvy o účasti na řešení projektu výzkumu a vývoje č. TH04010034 s názvem „Prediktivní systém ochrany trolejových vedení proti extrémním klimatickým podmínkám“ a o využití výsledku vývoje a výzkumu. Číslo smlouvy: 23963/2018/00. Příjemce TRIBOTEC, spol. s r.o., Na Výsluní 201/13, 100 00 Praha, IČ: 60737221. Další účastník Vysoké učení technické v Brně, Antonínská 548/1, 601 90 Brno, IČ: 00216305. Datum uzavření smlouvy 28.11.2018.

Odpovědná osoba pro licenční jednání: Ing. Milan Omasta, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Telefon: +420 54114 3323, email: omasta@fme.vutbr.cz.

Způsob realizace

Funkční vzorek byl na základě ověření vlastností konstrukce vyroben a je využíván jako laboratorní zařízení na pracovišti dalšího účastníka, Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno.

Výsledky zkoušek, použití

Výsledky zkoušek dosud nebyly publikovány.

Vazba na projekt

TH04010034 - Prediktivní systém ochrany trolejových vedení proti extrémním klimatickým podmínkám

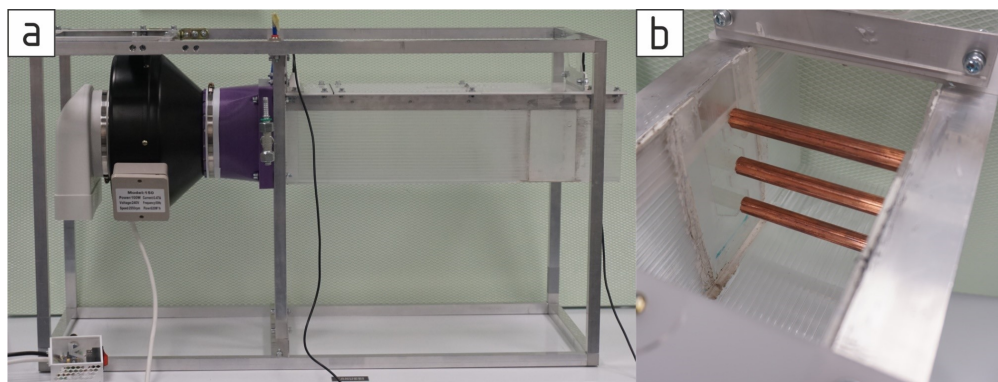
Umístění

Laboratoř A3/109
Ústav konstruování
Fakulta strojního inženýrství
Vysoké učení technické v Brně
Technická 2896/2
616 69 Brno

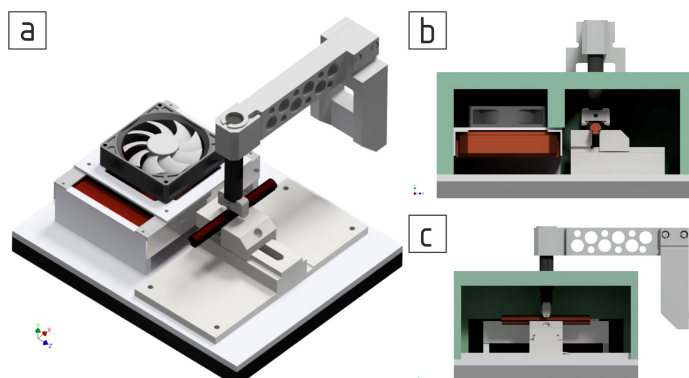
Kontaktní osoba

Ing. Milan Omasta, Ph.D.; +420 541143323; omasta@fme.vutbr.cz

Fotografická dokumentace



Funkční schéma



PŘÍLOHA 2

Konstrukce modulu tribometru pro měření trolejového drátu

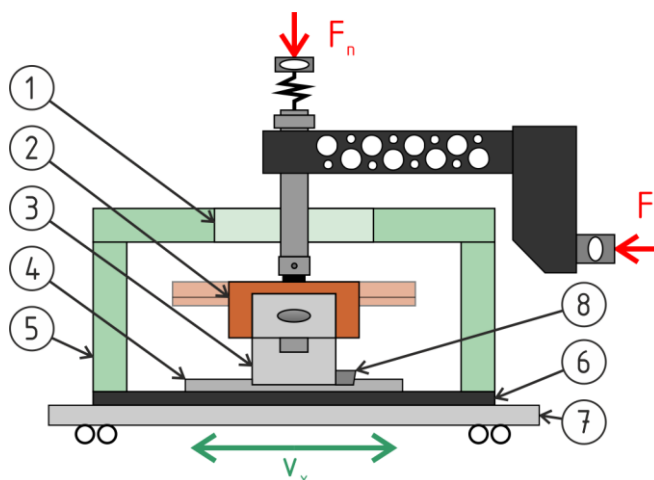
Definice požadavků

Pro potřeby tribologických testů trolejového drátu na tribometru Rtec Instruments MFT bylo nutné vytvořit modul, který tyto testy umožní. Cílem bylo vytvořit modul s univerzálním upínacím systémem pro vzorky trolejového drátu i jejich náhrady. Zároveň bylo požadováno, aby bylo možné testy provádět při nízkých teplotách pod bodem $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z toho důvodu bylo nutné celý modul koncipovat jako klimatickou komoru s tepelně izolovanými stěnami. Návrh modulu zároveň předpokládá upnutí tepelného výměníku zařízení pro zkoumání adheze námrazy k trolejovému drátu.

Bylo předpokládáno upínání vzorků trolejového drátu s průřezem AC-120 s délkou 122 mm. A také náhrady trolejového drátu v podobě měděné destičky a rozměrech $70 \times 35 \times 5$ mm. Velikost uvažované zátěžné síly je 100 N v normálovém směru a 150 N v tečném směru.

Konstrukce

Návrh konstrukce, viz obr. 1, byl řešen jako komora s otvorem pro měřicí rameno tribometru (1). Celé zařízení spočívá na velké izolační desce (6), která leží na posuvném stole tribometru (7). K němu je přišroubována šrouby přes ocelovou desku (4). Ta přenáší silové zatížení z přesného svěráku (3), který je do ní upnut pomocí klínu (8). Pomocí tohoto svěráku je řešeno upínání různých typů vzorků. Uvnitř modulu je tepelný výměník pro chlazení vnitřního vzduchu napojený na externí chladicí jednotku. Přívod tepla do výměníku je řešen ventilátorem.



obr. 1 Návrh konstrukce modulu pro tribometr

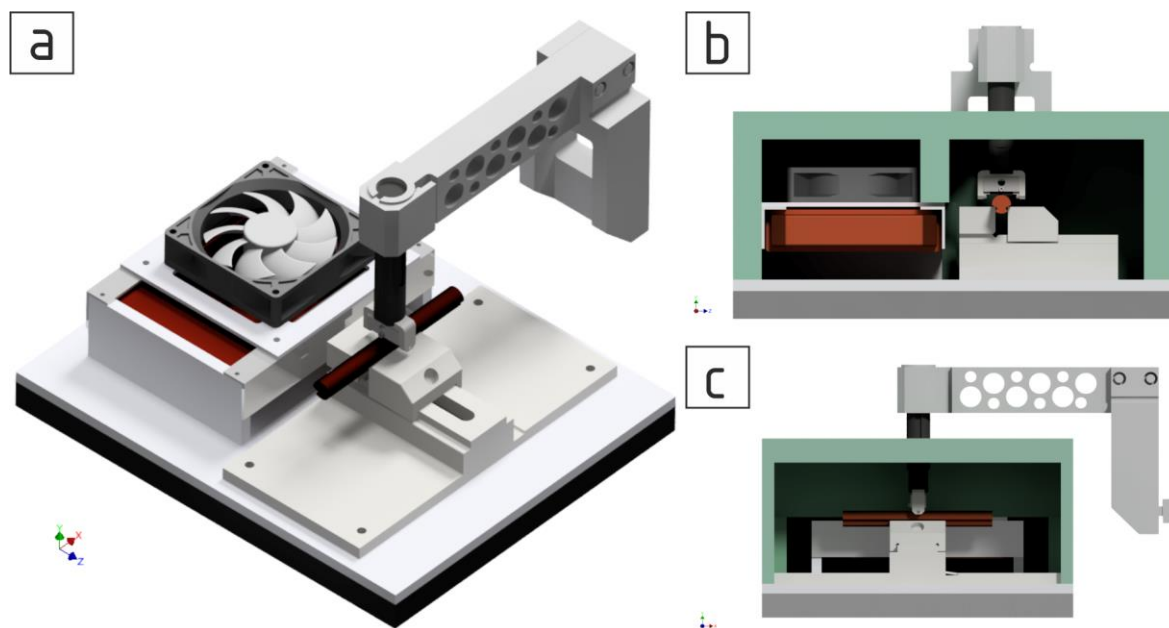
Jako základová tepelněizolační deska byl použit PMMA panel tloušťky 8 mm, který byl řezán svépomocí na CO₂ laseru. Tento materiál je snadno dostupný a díky přístupu k laseru i snadno opracovatelný. Pro dané použití má dostatečné mechanické vlastnosti, a navíc disponuje nízkou tepelnou vodivostí oproti oceli nebo hliníku. To je žádoucí, protože stůl tribometru je masivní kovový díl, který skrz, který by z komory bylo vyváděno velké množství tepla. Půdorys desky kopíruje stůl tribometru a obsahuje čtyři otvory pro šroubové spoje připevňující modul.

Jako kryt modulu byl použit tvrzený polystyren tloušťky 20 mm. Ten poskytuje velmi nízkou tepelnou vodivost, je snadno dostupný a opracovatelný. Z něj byla navrhnutá samonosná konstrukce spojená pomocí lepení. Jeho řezání bylo také řešeno svépomocí na drátové rezačce polystyrenu. Kryt má podobu vany, na které je dvojdílné víko s otvorem pro měřící rameno tribometru. Navrhnutá velikost tepelného krytu k

Pro upínání dílenského svěráku byla použita ocelová deska z válcovaného profilu 110 x 10 mm. Ten byl krácen frézován na délku 230 mm a výšku 9 mm. Tato rovná plocha se poté opírala o PMMA desku podstavy. Svěrák byl do desky upnut pomocí vyfrézované drážky v desce a prostorem na klín. Klín je k desce šroubován pomocí dvou šroubů a díky skosení vyvozuje přítláčnou sílu, která drží svěrák. V rozích desky jsou čtyři díry pro palcové šrouby velikosti NO. 10.

Tepelný výměník je standartní pro kapalinu-vzduch. Nad ním je upnut ventilátor o rozměrech 92 x 92 mm. Jedná se o ventilátor na 12 V se zvýšenou ochranou proti vlhkosti. Jeho umístění je nad tepelným výměníkem a proud vzduchu jím generovaný bude směřován do výměníku. Tím se zabrání stékání případné kondenzované vlhkosti do ventilátoru.

Vzhledem k charakteru zatížení se nepředpokládá namáhání některého z prvků, tak by to ovlivnilo funkci zařízení, nebo poškození některého z jejích členů.



obr. 2 Modul pro měření vzorků trolejového drátu na tribometru při nízkých teplotách

Výpočet tepelných ztrát komory

Ověření, zdali navržená tepelná izolace pro klimatickou komoru je dostatečná, byla použita rovnice pro tepelný tok. Model klimatické komory si zjednodušíme a popíšeme ji jako 1D prostup tepla šesti jejími stěnami. Rovnice (1) popisuje tepelný tok mezi dvěma tekutinami přes pevnou přepážku. Kde k představuje odpor vůči touto toku, S velikost plochy, přes kterou je teplo vedeno a t_{in} , t_{out} rozdíl teplot

$$\dot{Q} = kS(t_{in} - t_{out}) \quad (1)$$

\dot{Q}	tepelná tok mezi dvěma tekutinami	[W]
k	součinitel prostupu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
S	plocha stěny	[m ²]
t_{in}	teplota uvnitř komory	[°C]
t_{out}	teplota vně komory	[°C]

Velikost součinitele přestupu tepla se dá určit na základě rovnice.

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \quad (2)$$

α_1	součinitel přestupu tepla pro vnitřní stěnu	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
α_2	součinitel přestupu tepla pro vnější stěnu	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
δ	tloušťka stěny	[m]
λ	součinitel tepelné vodivosti	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]

Pro výpočet byly použity následující hodnoty:

$\alpha_{1_1} = 7,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel přestupu tepla pro vnější stěnu svislou
$\alpha_{1_2} = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel přestupu tepla pro vnější stěnu podstavy
$\alpha_{1_2} = 5,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel přestupu tepla pro vnější stěnu víka
$\alpha_2 = 25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel přestupu tepla pro vnitřní stěnu
$\lambda_{\text{XPS}} = 0,034 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti pro tvrzený polystyren
$\lambda_{\text{PMMA}} = 0,19 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti pro PMMA desku
$\delta_{\text{XPS}} = 20 \text{ mm}$	tloušťka stěny pro tvrzený polystyren
$\delta_{\text{PMMA}} = 8 \text{ mm}$	tloušťka stěny pro PMMA desku
$t_{in} = -10 \text{ °C}$	teplota uvnitř komory
$t_{out} = 22 \text{ °C}$	teplota vně komory
$s = 230 \text{ mm}$	střední šířka komory
$d = 285 \text{ mm}$	střední délka komory
$v = 114 \text{ mm}$	střední výška komory
$S_1 = s \cdot v = 230 \cdot 114 = 0,026 \text{ m}^2$	plocha čela komory
$S_2 = d \cdot v = 285 \cdot 114 = 0,032 \text{ m}^2$	plocha boku komory
$S_3 = d \cdot s = 285 \cdot 230 = 0,066 \text{ m}^2$	plocha podstavy komory

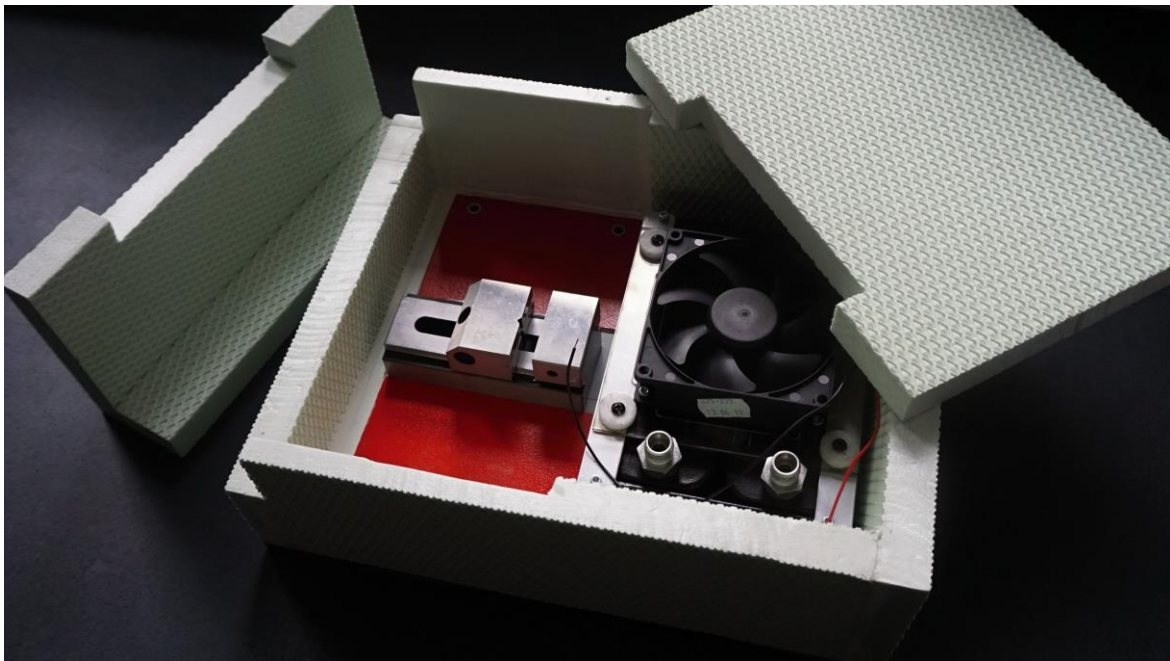
$$k_1 = \left(\frac{1}{\alpha_{1,1}} + \frac{\delta_{XPS}}{\lambda_{XPS}} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} = 1,319 \text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}$$

$$k_2 = \left(\frac{1}{\alpha_{1,2}} + \frac{\delta_{PMMA}}{\lambda_{PMMA}} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} = 5,491 \text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}$$

$$k_3 = \left(\frac{1}{\alpha_{1,2}} + \frac{\delta_{XPS}}{\lambda_{XPS}} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} = 1,254 \text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}$$

$$\dot{Q} = (k_1 \cdot 2S_1 + k_1 \cdot 2S_2 + k_2 \cdot 2S_3 + k_3 \cdot 2S_3)(t_{in} - t_{out}) = -33 \text{ W}$$

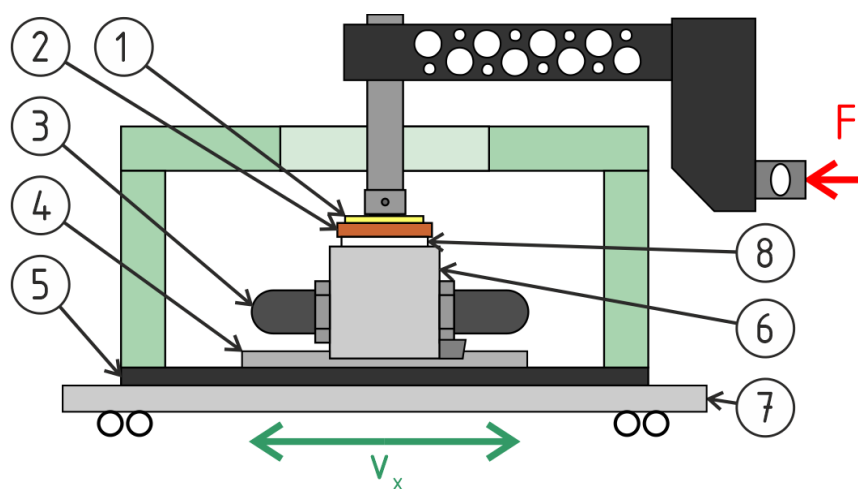
Dle provedeného výpočtu je tepelný tok z komory -33 W. To znamená, že vnitřní prosto komory bude ohříván tepelným tokem přibližně 33 W. Vzhledem ke chladicímu výkonu jednotky použité jednotky Haake DC50-K41 při 0 °C 750 W je tato hodnota shledána jako dostatečná. Sestavené testovací zařízení je vidět na obr. 3.



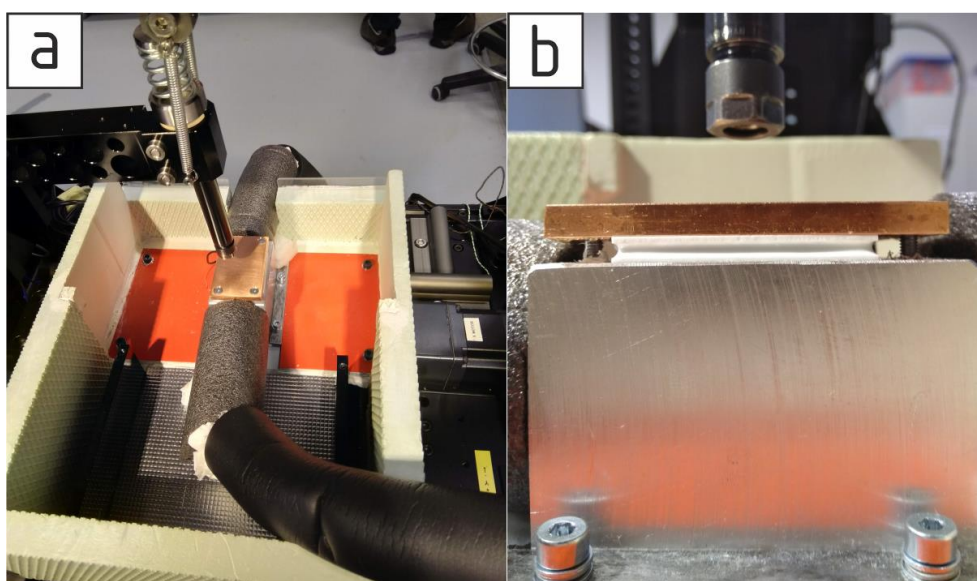
obr. 3 Sestavené testovací zařízení

Zařízení pro studium adheze

Pro studium adheze námrazy k trolejovému drátu sestaveno jednoduché testovací zařízení, viz obr. 4. Skládá se z tepelného výměníku (4) v podobě hliníkového bloku s jednou vtanou dírou skrz a závity na jejími konci. Na ně se přímo napojuje pomocí okruh chladícího zařízení. Ten je v podobě chladicí jednotky s oběhovým čerpadlem Haake DC50-K41. Ta dokáže udržovat teplotu na chladiči na $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na chladiči je umístěn teplou stranou peltierův článek TEC1-12706 o výkonu 60 W. Ten je napájen pomocí výkonného zdroje, protože článek může dosáhnout maximálního odběru i 5 A při 14 V. Článek je přitlačován destičkou z elektrovedné mědi E-Cu57. Ta má rozměry 65 x 40 x 5 mm a je v rozích přišroubována čtyřmi zápustnými šrouby do hliníkového bloku. Tato destička je pomocí peltierova článku chlazena a je možná u ní dosáhnout teploty až $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ krátkodobě, nebo přibližně $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ při neomezené době. Vyroběné zařízení lze vidět na obr. 5.



obr. 4 Schéma konfigurace testovacího zařízení pro studium adheze ledu



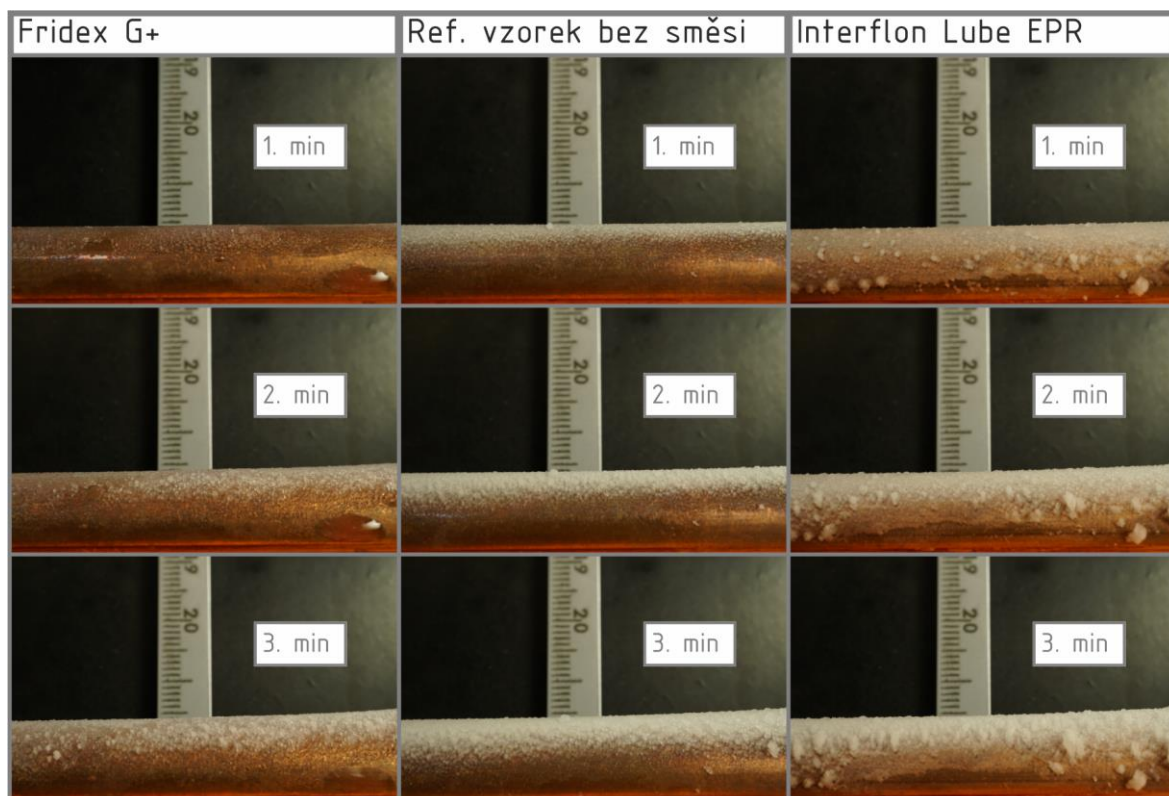
obr. 5 Zařízení pro měření adheze ledu, a) celkový pohled, b) detailní pohled

PŘÍLOHA 3

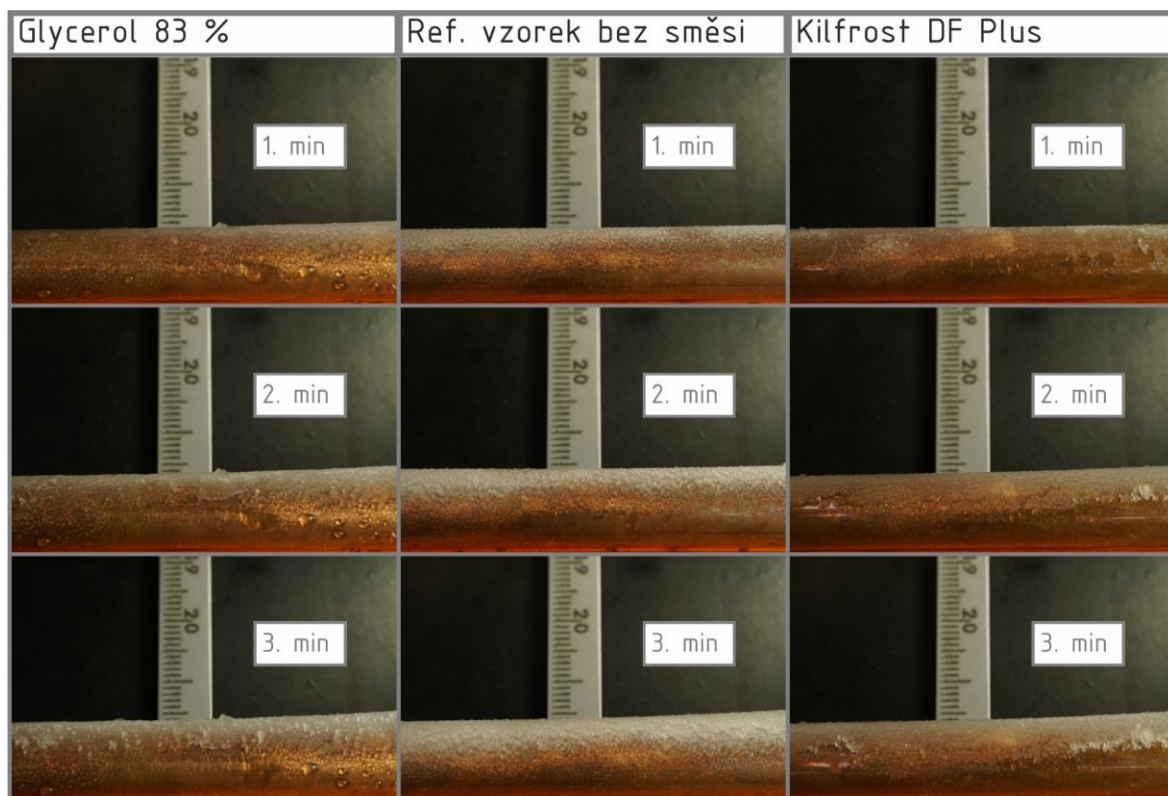
Kinematika námrazy na trolejovém drátu ve fotografiích



obr. 1 Měření kinematiky námrazy 1. sada vzorků



obr. 2 Měření kinematiky námrazy 1. sada vzorků



obr. 3 Měření kinematiky námrazy 3. sada vzorků



obr. 4 Měření kinematiky námrazy 4. sada vzorků – při měření došlo k většímu ochlazení přiváděné vody a první v první minutě došlo k růstu průsvitné námrazy

PŘÍLOHA 4

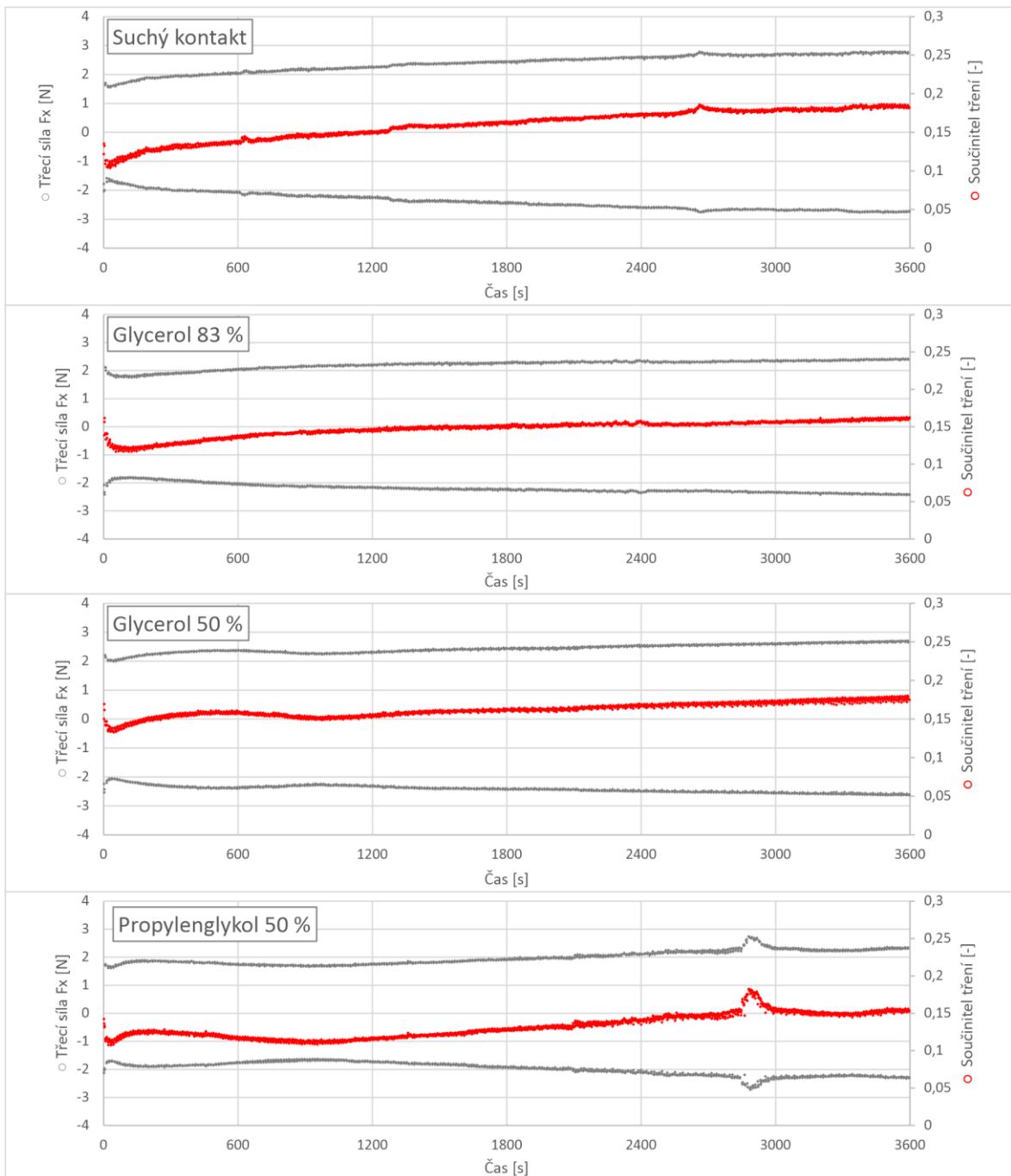
Fotografie kapky použité pro určení kontaktního úhlu směsí



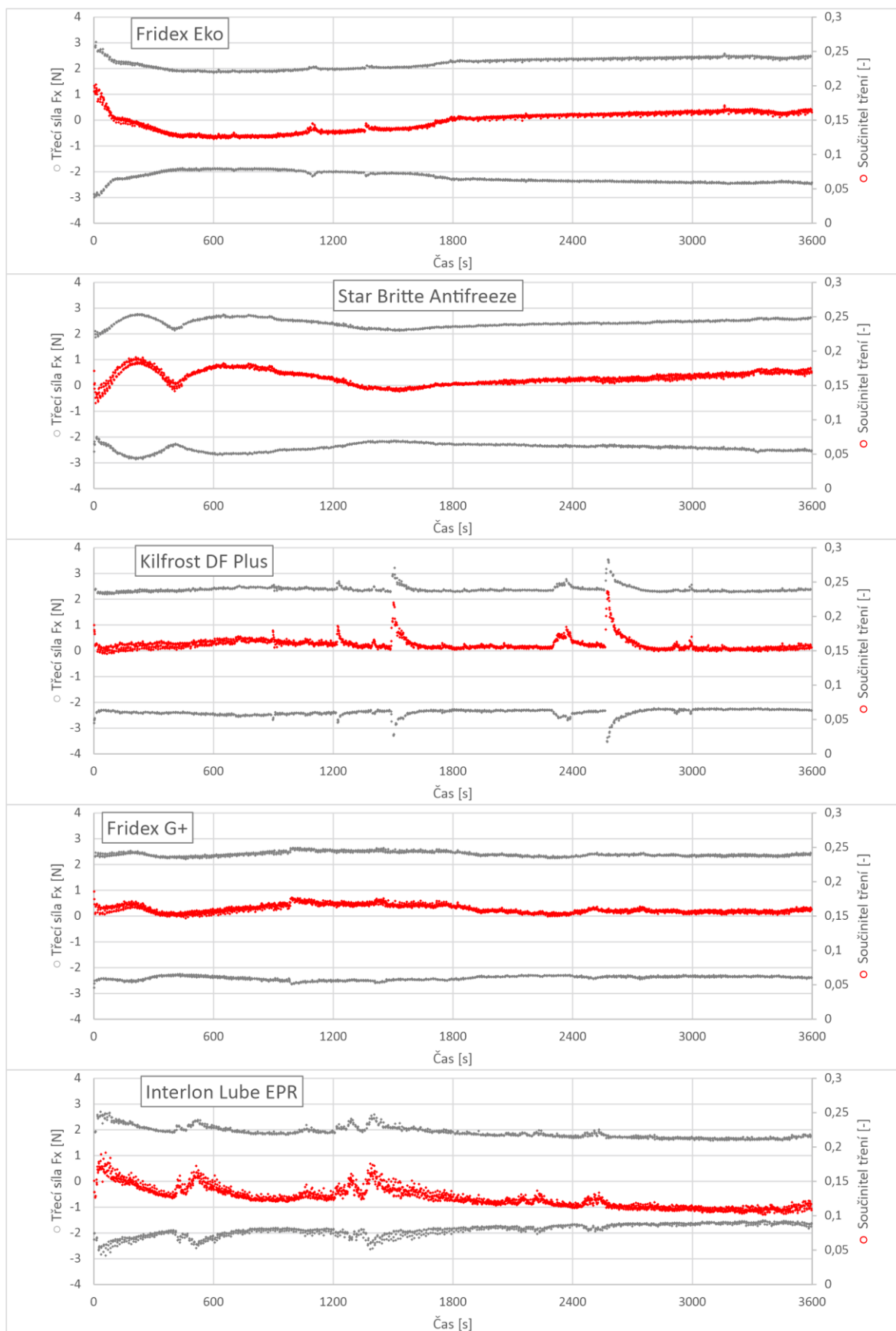
obr. 1 Fotografie kapky směsí proti námraze o velikosti 2 μ l na měděném povrchu

PŘÍLOHA 5

Výsledky měření kontaktu sběrač trolej na tribometru



obr. 1 Výsledky měření součinitele tření z tribometru Rtec Instruments MFT



obr. 2 Výsledky měření součinitele tření z tribometru Rtec Instruments MFT