

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**Ústav procesní a zpracovatelské techniky**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Tvorba umělého sněhu**

**Jakub Lojek**

**2019**



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lojek** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **457564**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**  
Studijní program: **Strojírenství**  
Studijní obor: **Energetika a procesní technika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Tvorba umělého sněhu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Artificial snow production**

Pokyny pro vypracování:

Cílem této práce bude návrh zařízení pro tvorbu umělého sněhu. V rámci práce bude provedena rešerše zaměřená na principy vzniku sněhu, parametry tvorby a zařízení pro tvorbu umělého sněhu. Výstupem bude návrh zařízení pro tvorbu umělého sněhu.

Seznam doporučené literatury:

Chuji Takahashi, Growth of snow crystals from frozen water droplets, Atmospheric Research 82 (2006) 385–390.  
Katsuhiro Kikuchi, A global classification of snow crystals, ice crystals, and solid precipitation based on observations from middle latitudes to polar regions, Atmospheric Research 132–133 (2013) 460–472  
SG3™ E-Type (External Mix) Snowmaker Plans, 2011 SNOWatHOME, LLC.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

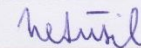
**Ing. Michal Netušil, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS**


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **07.06.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
Ing. Michal Netušil, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

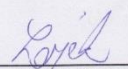
  
prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

**30-04-2019**  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne .....

.....

Jméno a Příjmení

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi s prací pomohli. Zejména vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Michalu Netušilovi Ph.D. za poskytnuté informace a odborný dohled. Dále chci poděkovat rodině za velikou podporu během celého studia.

## Anotační list

**Jméno autora:** Jakub

**Příjmení autora:** Lojek

**Název práce česky:** Tvorba umělého sněhu

**Název práce anglicky:** Artificial snow production

**Rozsah práce:**  
počet stran: 42  
počet obrázků: 25  
počet tabulek: 4  
počet příloh: 1

**Akademický rok:** 2018-2019

**Jazyk práce:** čeština

**Ústav:** Ústav procesní a zpracovatelské techniky

**Studijní program:** Strojírenství

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Netušil Ph.D.

**Konzultant práce:** Ing. Michal Netušil Ph.D.

**Zadavatel:** Ing. Michal Netušil Ph.D.

**Anotace česky:** Cílem této práce bude návrh zařízení pro tvorbu umělého sněhu. V rámci práce bude provedena rešerše zaměřená na principy vzniku sněhu, parametry tvorby a zařízení pro tvorbu umělého sněhu. Výstupem bude návrh zařízení pro tvorbu umělého sněhu

**Anotace anglicky:** The aim of the thesis is to design equipment for artificial snow production. The thesis will include a literature research focused on the principles of artificial snow formation, parameters of creation and equipment used for artificial snow production. The output shall be a design of equipment for artificial snow formation.

## Abstrakt

Tato práce se zabývá tvorbou umělého sněhu, parametry tvorby a zařízením pro tvorbu umělého sněhu. V úvodní teoretické části jsou popsány objevy sněhových krystalů a jejich klasifikace, laboratorní zařízení pro tvorbu umělého sněhu a podmínky, za kterých dochází k růstu sněhového zárodku. Dále teoretický popis Joule-Thomsonova jevu.

Praktická část je zaměřena na procesní návrh zařízení pro tvorbu umělého sněhu. Součástí je výpočet Joule-Thomsonova jevu. Výstupem práce je návrh zařízení pro tvorbu umělého sněhu

Klíčová slova: umělý sníh, klasifikace sněhu, joule-thomsonův jev, zařízení pro tvorbu sněhu

## Abstract

This bachelor thesis is focused on creation of artificial snow, parameters of creation and snow maker apparatus. Firstly, in theoretical part the snow crystals and their classification, laboratory apparatus and conditions under which is created snow germ are described. Secondly, there is a theoretical description of Joule-Thomson effect.

Practical part is focused on procedural snow maker suggestion of artificial snow with enumeration of Joule-Thomson effect. The output of the thesis is the design of an apparatus for artificial snow production.

Keywords: artificial snow, snow classification, joule-thomson effect, snow maker apparatus

# Obsah

---

Seznam obrázků .....	8
Seznam tabulek .....	9
Seznam použitých znaků a zkratek .....	10
1. Úvod.....	12
2. Teoretická část.....	13
2.1. Klasifikace sněhových krystalů .....	13
2.2. Růst krystalů .....	18
2.3. Tvar a růst ledových krystalů .....	19
2.4. Umělý sníh s přídavnými složkami .....	22
2.5. Princip umělého zasněžování v praxi .....	23
2.6. Joule-Thomsonův jev .....	24
2.7. Stanovení Joule-Thomsonova koeficientu při laboratorním experimentu .....	29
3. Praktická část.....	31
3.1. Návrh zařízení pro tvorbu umělého sněhu.....	31
3.2. Výpočet Joule-Thomsonova jevu a jeho využití .....	38
3.3. Shrnutí .....	42
4. Závěr.....	43
5. Použitá literatura .....	44

Příloha

## Seznam obrázků

Obrázek 1. Mikroskopická fotografie sněhových krystalů C1a až P6d [1] .....	15
Obrázek 2. Mikroskopická fotografie sněhových krystalů P7a až CP8d [1] .....	16
Obrázek 3. Mikroskopická fotografie sněhových krystalů CP9a až H4a [1] .....	17
Obrázek 4. Částice ledu ze zmrzlých kapiček v počáteční fázi. Částice jsou zachyceny při teplotách a) -31 °C, b) -33,2 °C a c) -22 °C. Měřítka 50 μm [3].....	18
Obrázek 5. Difuzní oblačná komora [3].....	19
Obrázek 6. Ledové částice rostou ze zmrzlých vodních kapek. Jev je doprovázen vývojem kruhových krystalických ploch. Růst částic závislosti na teplotě. a) -27,0, b) -31,1, c) -25,5, d) -28,8, e) -28,4, f) -33,2, g) -6,7 h) -18,9, i) -12,0 °C. Měřítka = 50 μm.....	20
Obrázek 7. Nesymetrický růst zmrzlé vodní kapky. Ledové částice při teplotě a) -12, b) -15,1, c) -18,9 °C. Měřítka je rovno 50 μm. [3] .....	21
Obrázek 8. Ledový krystal kulovitěho tvaru s rozdílným vzorem na vnější povrchu při teplotě -22 °C. Měřítka 50 μm [3] .....	21
Obrázek 9. Detail trysek sněžného děla.....	23
Obrázek 10. Joule-Thomsonův jev [8].....	24
Obrázek 11. Mezní diagram.....	26
Obrázek 12. Fázový diagram vody .....	28
Obrázek 13. Celkový pohled na aparaturu: TL - tlaková láhev s plynem, SPH - spojovací pružná hadice, RM - ručičkový manometr, RV - redukční ventil, ET1 a ET2 - elektrické teploměry, JTP - přístroj na měření Joule-Thomsonova koeficientu [10] .....	29
Obrázek 14. Detail redukčního ventilu RV s napojením na tlakovou lahev TL, VVP – ventil výstupního plynu o nastaveném pracovním tlaku, HV – hlavní ventil tlakové lahve, Š – šroub k nastavování pracovního tlaku.....	30
Obrázek 15. Detail přístroje JTP, F - frity, ET1 a ET2 - elektrické teploměry měřící teplotu plynu před a za fritou, RM - ručičkový manometr .....	31
Obrázek 16. Na obrázcích je vidět tryska, kterou je vstřikována voda a otvor, kterým proudí vzduch. Na dolním obrázku je tvorba sněhu.....	33
Obrázek 17. Schéma zařízení .....	33
Obrázek 18. Zasněžovač SG6 Xstream .....	34
Obrázek 19. Schéma větrného a klimatického tunel [12].....	35
Obrázek 20. Podélný řez klimatické sekce při tvorbě dešťových kapek [11] .....	36
Obrázek 21. Závislost průměru kapek a množství srážek na tlaku .....	36
Obrázek 22. Schéma uspořádání generační komory v klimatické sekci [12].....	37
Obrázek 23. Příklady tvorby sněhu v generační komoře v klimatické sekci [12] .....	37
Obrázek 24. Graf závislost J-T na teplotě.....	39
Obrázek 25. Grafy pro teploty $T_1 = +5; +2; 0; -2$ °C.....	41



## Seznam tabulek

---

<b>Tabulka 1: Konstanty a, b [19] .....</b>	<b>28</b>
<b>Tabulka 2. Vypočítané konstanty a, b.....</b>	<b>38</b>
<b>Tabulka 3. Vypočítané hodnoty J-T koeficientu v závislosti na teplotě .....</b>	<b>39</b>
<b>Tabulka 4. Hodnoty teplot <math>T_2</math> v závislosti na <math>T_1</math> a <math>\Delta p</math> .....</b>	<b>40</b>

## Seznam použitých znaků a zkratek

---

INA – ice nucleation activity

$p$  – tlak

$T$  – teplota

$\Delta p$  – změna tlaku

$\Delta T$  – změna teploty

$V$  – objem

$E$  – energie

$H$  – entalpie

$V_m$  – molární objem

$a, b$  – konstanty van der Waalsovy rovnice

$R$  – molární plynová konstanta

$p_{koh}$  – kohezní tlak

J-T jev – Joule-Thomsonův jev

$\mu_{JT}$  – Joule-Thomsonův koeficient

$T_{kr}$  – kritická teplota

$V_{kr}$  – kritický objem

$p_{kr}$  – kritický tlak

$\partial T$  – parciální derivace teploty

$\partial p$  – parciální derivace tlaku

$dT$  – derivace teploty

$dp$  – derivace tlaku

$T_i$  – inverzní teplota

$c_{pm}$  – měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku

TL – tlaková lahev

RV – redukční ventil

VVP – ventil výstupního plynu

SPH – spojovací pružné hadice

JTP – Joule-Thomsonův přístroj

ET – elektrický teploměr

EJ – elektrická jednotka

RM – ručičkový manometr

F – fritá

Š – šroub

HV – hlavní ventil

ASME/ANSI – technická norma

$\rho$  – hustota

$\nu$  – kinematická viskozita

# 1. Úvod

---

Úvodem bych chtěl nastínit, co to ve skutečnosti znamená umělý sníh. Pod pojmem umělý sníh si každý může představit trochu něco jiného. Umělý sníh můžou být jen zmrzlé kapičky vody, získané z laboratorního zařízení, nebo též ze sněžného děla. Také to ale je látka, která dokáže vydržet v tuhém stavu i při teplotách jednotek stupňů nad nulou. Látky, která natolik zlepšuje vlastnosti sněhu se budu věnovat v teoretické části. V zásadě je to tedy vše, co je vytvořeno zamrznutím vodních kapiček nepřírodní cestou, tedy vytvořené člověkem. V teoretické části se zabývám studiemi, které popisují a klasifikují sníh, jak přírodní, tak i umělý. Studií bylo provedeno opravdu mnoho. Do této práce jsem se snažil vybírat pouze ty, které jsou zásadní a důležité. Některé práce jsou si totiž podobné, popisují de facto ty samé poznatky a liší se v maličkostech. Umělý sníh se experimentálně vytváří od 60. let minulého století, ale první pokusy se datují ještě minimálně o 20 let zpět.

Uměle vytvořené částice pocházejí buď přímo z vodních kapek, nebo například z kondenzované mlhy. V této práci popisují jednu aparaturu na tvorbu sněhu a tou je oblačná komora. Jedním experimentálním zařízením na tvorbu umělého sněhu se zabývám i v praktické části. Jedná se o zařízení ve větrném tunelu, které má simulovat přírodní podmínky. Ve výsledku bude zařízení sloužit k testování ulpívání sněhu na konstrukcích ve venkovním prostředí. Sníh vzniká při určitých podmínkách. Ne vždy jsou však tyto podmínky dostatečné a přijatelné. Z toho důvodu byly podnikány kroky k tomu, aby se sníh „vylepšil“. Způsob, jak zvýšit teplotu nukleace, tedy tvorby zárodků sněhových krystalů, je v aditivu, příměsi. Touto příměsí je bakterie, respektive protein bakterií vytvořený.

Praktická část je zejména založena na výpočtu Joule-Thomsonova jevu, který aplikuji při návrhu zařízení na tvorbu umělého sněhu. Také se zde zmiňuji o experimentu ve větrném tunelu v Telči. Joule-Thomsonův jev je velmi zajímavý úkaz a možná ještě zajímavější je, že neplatí pro všechny látky stejně. Důsledkem tohoto jevu se při změně tlaku mohou některé plyny ochladit a některé naopak ohřát. Výpočet vychází z rozdílu tlaků a teplot. Výstupem je závislost teploty na tlaku, určení Joule-Thomsonovy konstanty a takový návrh, aby konečná teplota vzduchu byla  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při návrhu zařízení postupuji dle již zkonstruovaného zařízení.

Do praktické části jsem také zařadil výsledky testování ve větrném tunelu v Telči. Jak jsem již zmiňoval, v Telči se vytvářelo experimentální zařízení na tvorbu umělého sněhu. Zpráva, ze které vycházím je z roku 2017 a popisuje podmínky a parametry tvorby. Přišlo mi to zajímavé zmínit z toho důvodu, že se jedná o ukázkou toho, jak se může umělý sníh využít pro praktické účely. Umělý sníh se tedy nepoužívá jen na zasněžování sjezdovek, ale i k testování ve větrných tunelech. Je to pro mnoho odvětví zajímavé, jako například ve stavebnictví a strojírenství. Simulují se reálné podmínky a zdokonalují prvky ve zmíněných odvětvích.

## 2. Teoretická část

---

### 2.1. Klasifikace sněhových krystalů

Mezi první známé rozdělení se řadí to z roku 1938. Japonští vědci Ukichiro Nakaya a Yataro Sekido provedli klasifikaci tehdy pouze přírodního sněhu do 21 kategorií podle tvaru sněhových krystalů. V roce 1954 Nakaya rozšířil tuto škálu o dalších 21 kategorií, tedy na 42. Rozdělení bylo prováděno podle tvaru. Také bylo provedeno členění podle velikosti a to konkrétně na 10 skupin. Vedoucím práce byl americký chemik a meteorolog Vincent J. Schaefer. On také jako první vyvolal umělý sníh a dešťové srážky. Ukichiro Nakaya, se také zabýval studiem ledovců a sněhu a také se stal prvním člověkem, který uměle vytvořil krystal sněhu v laboratorních podmínkách. V roce 1966 byla pány Mogano a Lee vydána další studie, sněhové krystaly dělili opět na základě tvaru, a to do 80 kategorií. Byla široce využívána, avšak vzorky sněhu byly odebrány pouze na území Japonska. Další lokality, kde byly objevovány sněhové krystaly jsou v Rusku na Sibiři, v USA na Aljašce, v Kanada, ve Finsku, v Grónsku nebo na Jižním pólu. Kikuchi a Hogan v roce 1976 a 1979, dále Mogano roku 1978, Kikuchi a Kajikawa v roce 1979 nebo Walden a kolektiv v roce 2003. Publikací bylo samozřejmě vydáno víc, toto je jen malý výčet. A to jsem nezahrnul studie, které zkoumají krystaly umělého sněhu. Opět pouze jen pár autorů: Yamashita, 1979; Gonda, 1980 nebo Bailey a Hallett v letech 2004, a 2009. [1][3][4]

Během téměř jednoho století tedy bylo vytvořeno mnoho studií. Vědci v nich dělili krystaly ať už podle velikosti, či tvaru, ale ne všechny studie byly po svém zveřejnění využívány v praxi. V podstatě neexistoval ucelený, jednotný systém, který by zahrnoval všechny typy krystalů. Na začátku 21. století navíc byly při experimentu objeveny a popsány nové druhy. V roce 2012 tak vznikl nový koncept, který, jak už jsem zmiňoval, zahrnuje tři kategorie. Hlavní či obecná obsahuje 8 skupin, ty se dělí do 39 podskupin a ty se dále dělí do 121 druhů. [1]

#### 2.1.1. Dělení sněhových krystalů

Sněhové krystaly rostou do různých tvarů a dosahují různých velikostí od desítek mikrometrů až po 10 milimetrů. Velikost krystalů se tedy může lišit až o 4 řády. Co se týká tvaru, tak hlavní či obecná kategorie, dělicí se tedy na 8 skupin rozlišuje ty nejobecnější tvary.

- **C – sloupcové (Column crystal group)**

Průměrná délka krystalů se pohybuje od 0,5 do 2 mm. Zajímavostí je, že krystal C3d byl uměle vytvořen v roce 1965 při teplotách od -45 do -50 °C.

- **P – rovinné (Plane crystal)**

Krystaly typu P3 a P4 mohou mít velikost v průměru i větší než 10 mm. Jinak nejčastější velikost je okolo 3 mm. Krystaly ve skupině P5, konkrétně P5e a P5f, jsou nově zaznamenané kategorie.

- **CP – kombinace sloupcových a rovinných**

Jedná se o nejpočetnější skupinu krystalů. Velikostně dost podobné, od 0,2 do 8 mm. Krystal CP6 byl objeven při teplotě vzduchu -25 °C. Skupiny CP6, CP7, CP8 a CP9 v dřívějších studiích (1954 a 1966) vůbec nebyly. CP7 byly například objeveny v roce 1968 a 1969 na Antarktidě. Dále byly pozorovány v arktických oblastech Norska, Švédska Kanady a Grónska a pouze při teplotách nižších než -25 °C. Tyto krystaly byly také uměle vytvořeny v oblačné komoře (cloud chamber).

- **A – agregáty (Aggregation of snow crystal group)**

Jedná se vždy o vytvoření shluku jednotlivých skupin. A1 je kumulace C krystalů, A2 poté P krystalů a nakonec A3 tvoří CP krystaly.

- **R – lemované (Rimed snow crystal group)**

Dalo by se říct, že ve skupiny R1, R2 jsou „modifikované“ krystaly. Například krystal R1a zobrazuje lemované krystaly C1 až C4. R1b jsou naopak lemované krystaly typu P1. Rozměr krystalů bývá podobný těm původním. Skupina R2 zahrnuje hustě lemované krystaly. Ve skupině R3 jsou kroupovité krystaly. A R4 obsahuje již malé krupky do 3 mm.

- **G – zárodky (Germ of ice crystal group)**

Do této kategorie patří krystalky o velikosti menší než 0,1 mm. Často se vyskytují ve středních zeměpisných šířkách a polárních oblastech. Tyto krystaly se rozrůstají z vodních kapek v oblacích. Skupina G1 dorůstá do velikosti 50  $\mu\text{m}$ . Skupiny G2, G3, G4 mohou mít velikost i 100  $\mu\text{m}$ . A pro zajímavost, kategorie G3 je nová kategorie, která dříve nebyla klasifikována.

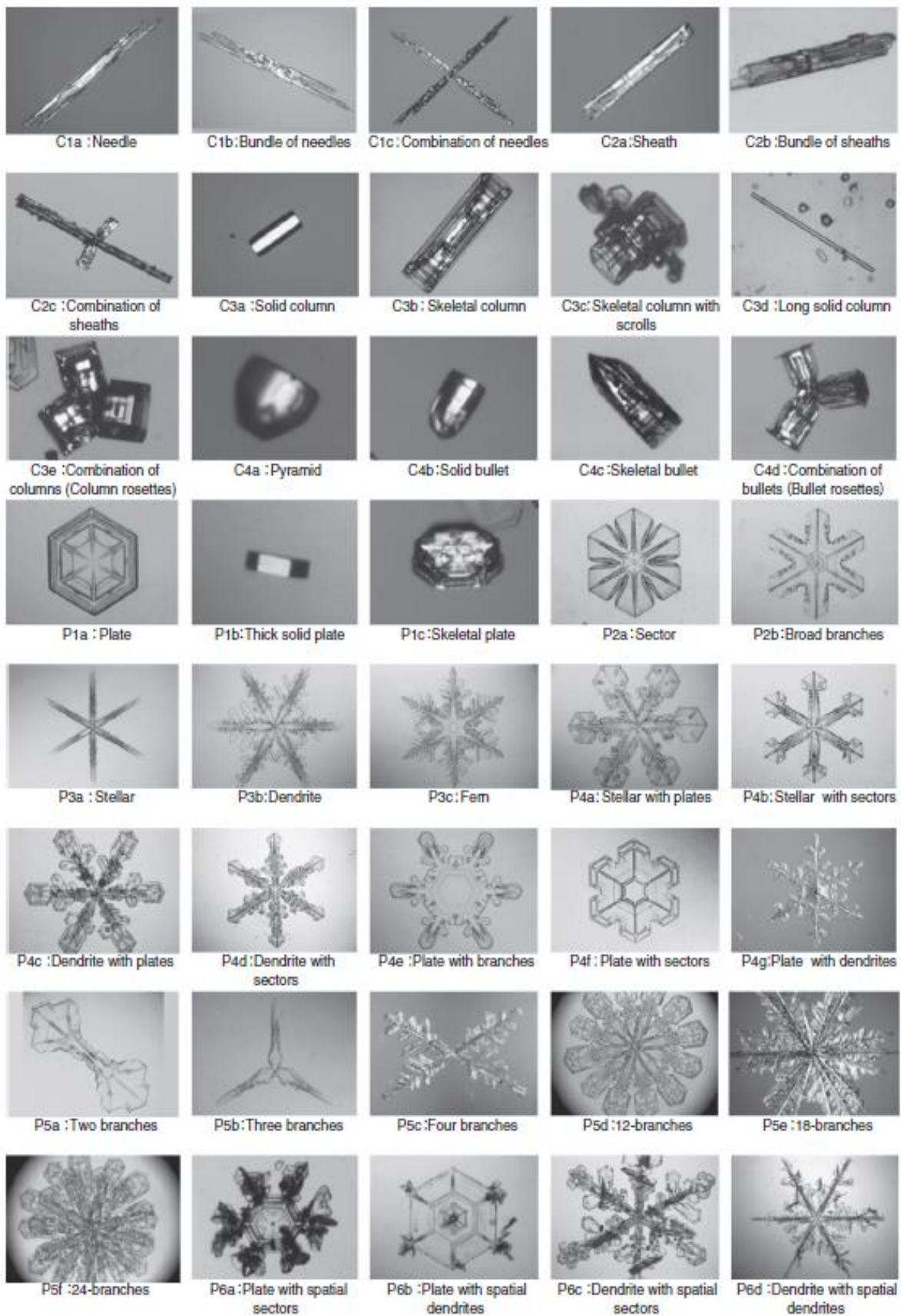
- **I – nepravidelné (Irregular snow particle group)**

Tato kategorie zahrnuje sněhové částice, které jsou unášeny se silným větrem ze sněhové pokrývky. Krystaly ve skupině I2 jsou lemované. U všech skupin je velikost částic do 100  $\mu\text{m}$ .

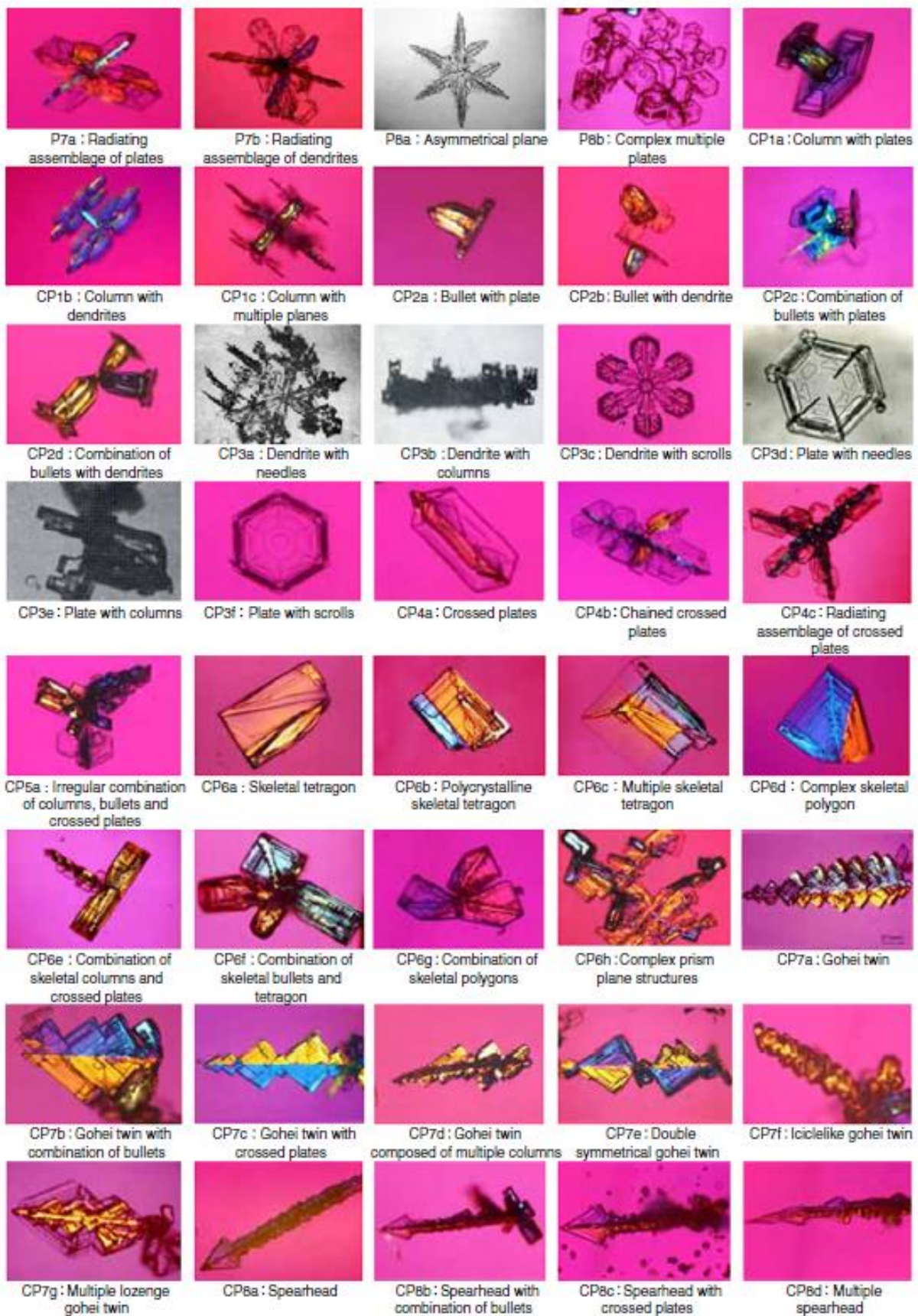
- **H – jiné (Other solid precipitation group)**

Jedná se o srážky, které nejsou ani sněhové částice, ani krystaly ledu. V klasifikacích z roku 1954 a 1966 nebyly zmíněny, avšak částečně byly zařazeny do studií 1951, kterou vedl Schaefer. Poté v letech 1957, 1971 pan Mason. Písmeno H značí, že se jedná o „hydrometeory“ a jsou obzvláště důležité při uměle vytvářeném sněhu. Rozměry se v této kategorii značně liší. Skupina H1 obsahuje krystaly o velikosti stovek  $\mu\text{m}$ . Naopak skupina H4 popisuje kroupy, které mohou mít i více jak 50 mm.

Obrázky 1, 2, 3 ukazují všech 121 základních druhů. [1]

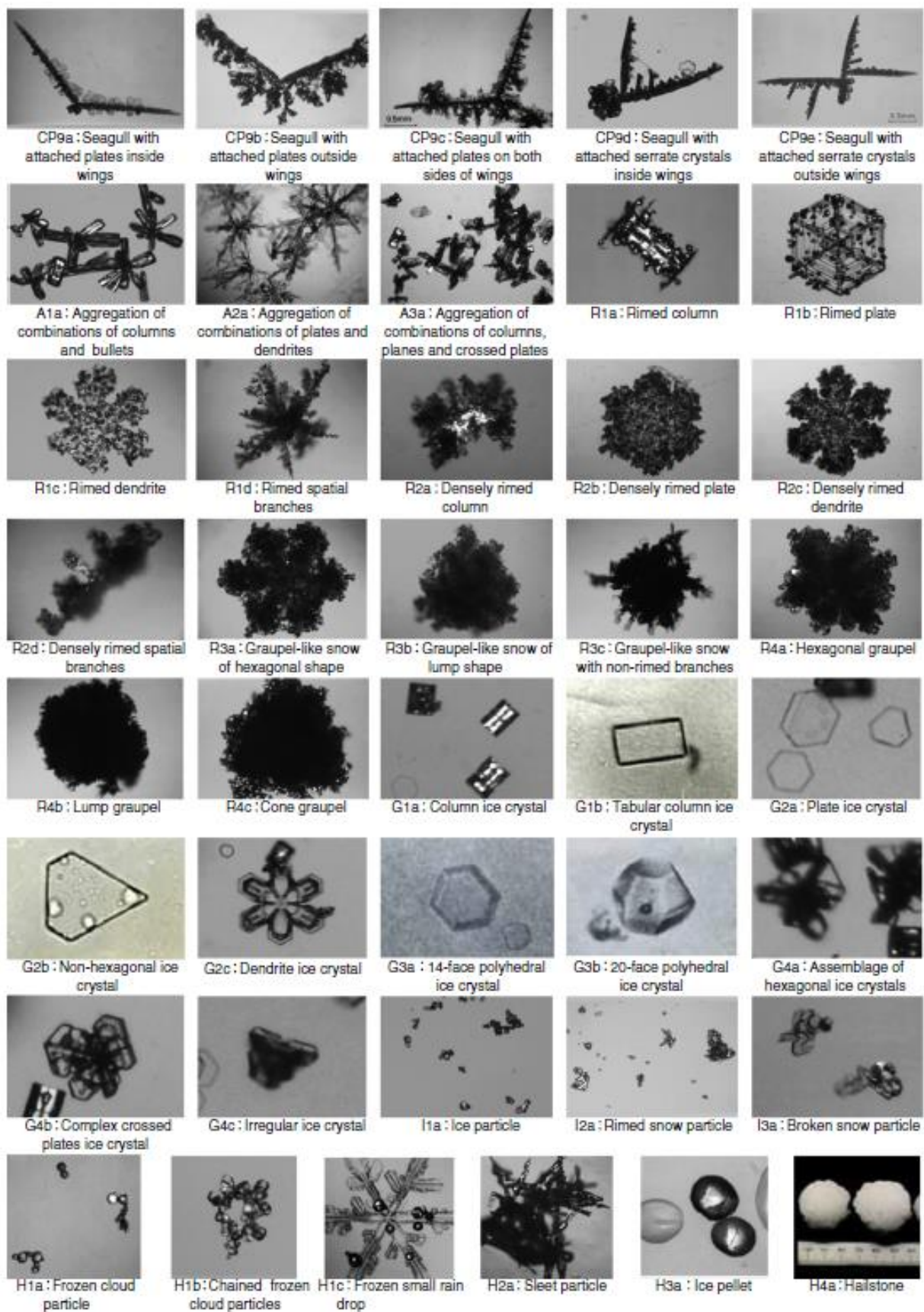


Obrázek 1. Mikroskopická fotografie sněhových krystalů C1a až P6d. [1]



Obrázek 2. Mikroskopická fotografie sněhových krystalů P7a až CP8d [1]





Obrázek 3. Mikroskopická fotografie sněhových krystalů CP9a až H4a [1]

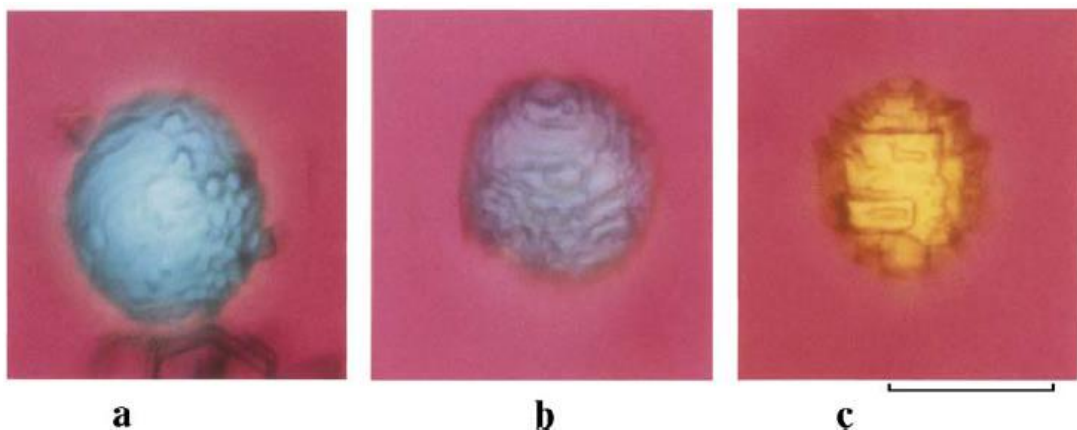
## 2.2. Růst krystalů

Pokusy s vodními kapkami byly prováděny od čtyřicátých let minulého století. Roku 1964 vědec J. Hallett experimentoval s kapkami vody o průměru 0,1 mm. Výsledkem byly jednotlivě zkrystalizované kapky vody. Růst nukleačního jádra byl zaznamenán nad teplotou  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . O devět let později ukázali pánové Pitter a Pruppacher a posléze Parungo a Weickmann růst krystalů při kontaktu s jílem a také s jodidem stříbrným. Teplota při tomto experimentu nepřešla pod  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Záleží přitom na povrchu a stavu růstů vodní kapky. Tento pokus dokázal krystalizaci vodní kapky v monokrystalizační částici. Dále naznačuje růst ledového krystalu v přírodním oblaku rovinně nebo sloupcově [3]

### 2.2.1. Podmínky růstu

V roce 2004 Alexei Korolev a kolektiv studovali růst zmražených kapek větších než  $100\text{ }\mu\text{m}$  v tepelné difuzní komoře. Změnu v závislosti na čase ovlivňovalo zejména přesycení, teplota a také velikost původní kapek. Ve srovnání s kapkami z mraků, byli tyto mnohem větší a zkonzovaly na umělém vlákne.

Pro přiblížení se skutečným podmínkám v přírodě byla sestavena oblačná komora. Slouží k pozorování růstu zmrzlých kapiček vody, které padají volným pádem z výšky 6,5 m. Popis a funkce oblačné komory jsou obsaženy v následující kapitole. [3]



Obrázek 4. Částice ledu ze zmrzlých kapiček v počáteční fázi. Částice jsou zachyceny při teplotách a)  $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$ , b)  $-33,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  a c)  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Měřítko  $50\text{ }\mu\text{m}$  [3]

### 2.2.2. Oblačná komora (Large cloud chamber)

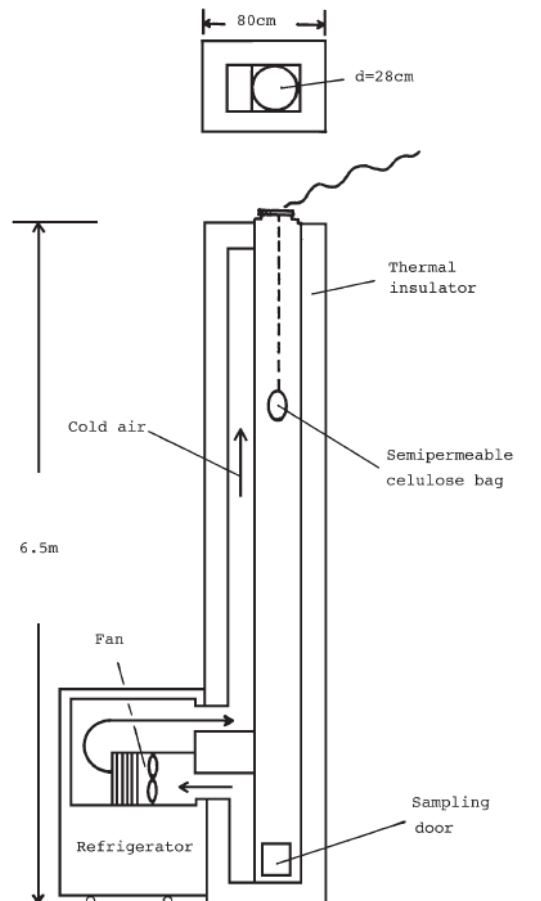
Experiment, při kterém dochází ke vzniku krystalů sněhu z vodních kapek se odehrává v difuzní oblačné komoře a je znázorněn na obrázku 5. Skládá se z nerezové ocelové trubky o výšce 6,5 m a průměru 28 cm. Je podchlazena na  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$  okolním cirkulujícím vzduchem a jeho teplota je udržována v rozmezí  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve vzdálenosti 50 cm od stropu až k patě komory. Samotný experiment se provádí při teplotě  $-5$  až  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Hlavní částí je polopropustný vak, který obsahuje 400 ml vody o teplotě  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a který vytváří podchlazený oblak. Vak je zavěšen seshora dolů a poté odstraněn. Po této operaci zůstával oblak v komoře přibližně 10 minut. Pro zachování podoby podchlazeného oblaku je zapotřebí provádět pokus při stálých podmínkách.

Vodní kapky obsahují jodid stříbrný. Suspenze je rozstříkávána pomocí spreje. Suspenze jodidu stříbrného je směsí jodidu draselného a roztoku dusičnanu stříbrného. Koncentrace roztoku je  $10^{-2}\text{ g/l}$ . K nukleaci vodních kapek při nízkých teplotách byl také použit roztok jodidu stříbrného o koncentraci  $10^{-5}\text{ g/l}$ . Většina vodních kapek produkovaná z roztoku

jodidu stříbrného o této koncentraci se přeměňovala při teplotě pod  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Průměr kapek se pohyboval od 20 do  $100\text{ }\mu\text{m}$ . [3]

Po zmrznutí vodních kapek v krystalky ledu, zvětšují krystalky svoji velikost během volného pádu komorou. Ledové krystalky byly sbírány v silikonovém oleji na dně komory po 60 až 90 sekundách po rozstříku vodních kapek z horního bodu komory. Poté byly krystalky uzavřeny krycím sklem, aby nedošlo k odpaření. Krystalky byly pozorovány pod polarizačním mikroskopem. [3]

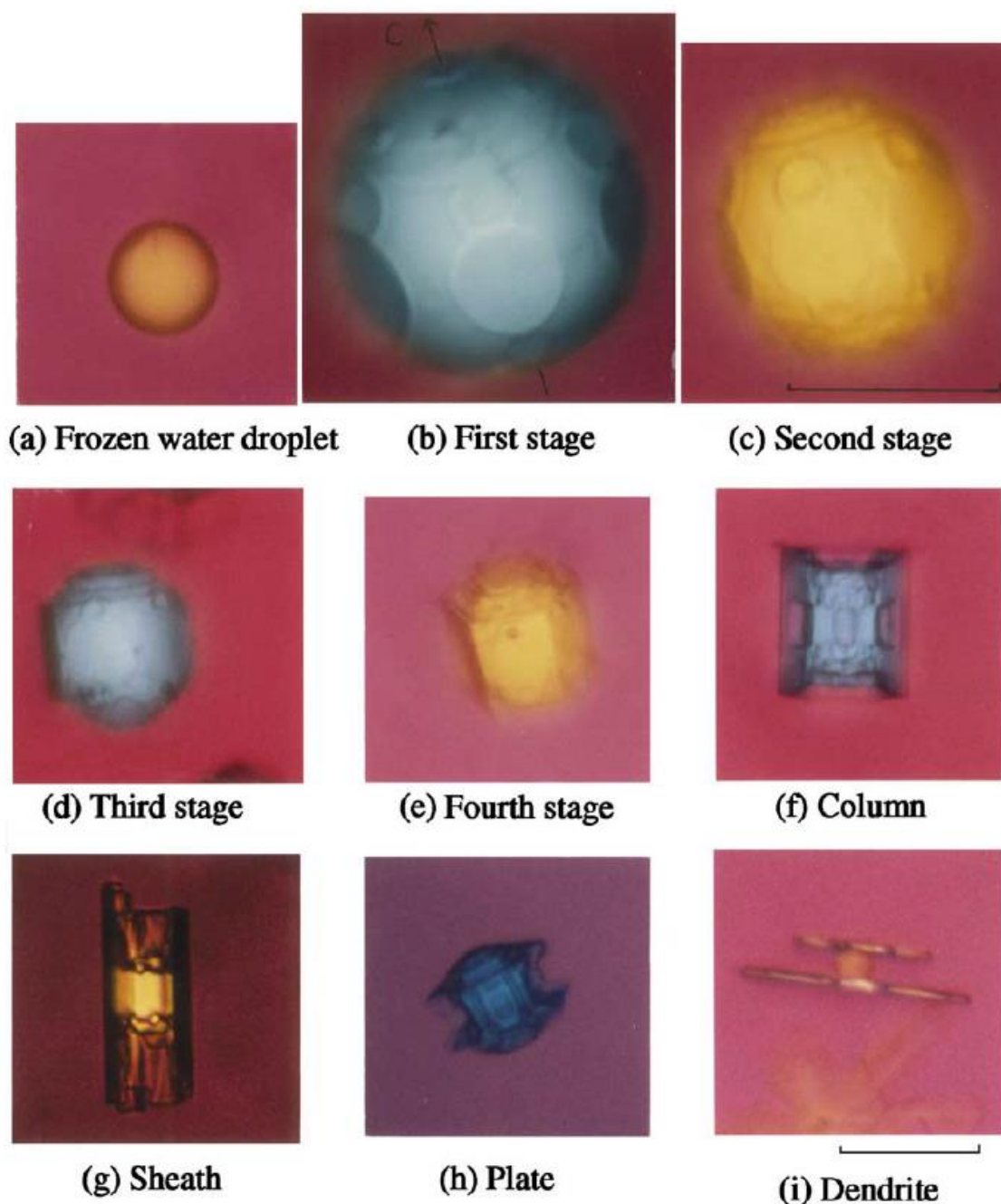


Obrázek 5. Difuzní oblačná komora [3]

### 2.3. Tvar a růst ledových krystalů

Zmrzlé vodní kapičky dorůstají do rozmanitých tvarů. Mnoho z těch, které jsou sesbírány ze dna komory bývají monokrystalické částice. Při růstu těchto monokrystalů byly pozorovány dva průběhy. V první variantě se objevuje 20 kruhových ploch na vnějším povrchu zmrzlé vodní kapky. Ve druhém případě se místo kruhových ploch objevují nepravidelné vzory.

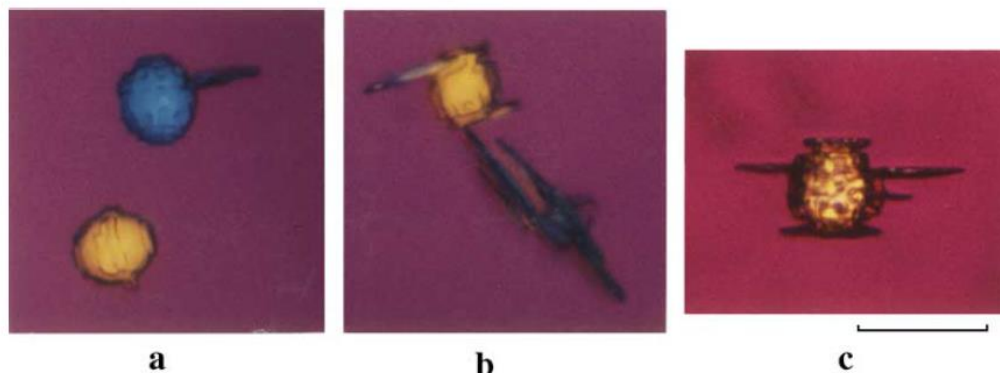
Na obrázku 6 je vidět, jak se mění velikost zmrzlých krystalů vody s měnící se teplotou. [3]



Obrázek 6. Ledové částice rostou ze zmrzlých vodních kapek. Jev je doprovázen vývojem kruhových krystalických ploch. Růst částic v závislosti na teplotě. a) -27,0, b) -31,1, c) -25,5, d) -28,8, e) -28,4, f) -33,2, g) -6,7 h) -18,9, i) -12,0 °C. Měřítko = 50  $\mu\text{m}$

V prvním stádiu růstu ledových krystalů bylo objeveno 20 kruhových krystalových ploch obrázek 6 b). Dvě základní (basal), 6 hranolových (prism) a 12 pyramidových (pyramidal) tvarů. Ve druhém stádiu se hranolové tvary spojily s pyramidovými a dále rostly, obrázek 6 c). Pyramidové nebyly v porovnání s hranolovými o mnoho menší. Uprostřed pyramidové tvaru byla objevena malá dutina. Ve třetím stádiu se spojily sousední hranolové tvary a zmizely pyramidové tvary po nichž zůstaly pouze dutiny. Ve čtvrtém stádiu krystalky dorostly do krátkých sloupcových krystalů (column-like crystals), obrázek 6 e). Poté se již vytvořily sněhové krystalky odpovídající teplotě a nasycení. Na obrázcích 6 f) a g) jsou krystalky sloupcové a jehlicovité s šestihranovou hranolovou symetrií. Poslední dva obrázky, tedy 6 h) a i) se vyznačují tím, že mají dvě plochy nad sebou. Podle tvaru to jsou bud krystalky

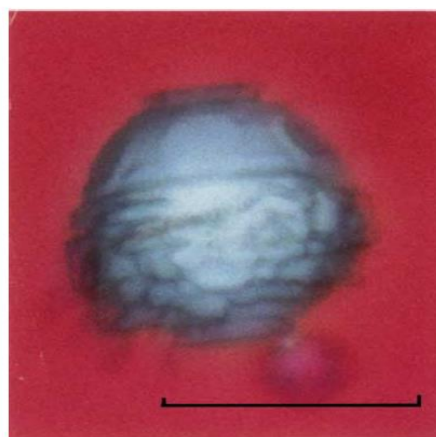
plošné nebo dendritické. Tyto dvouplošné krystaly nemají pokaždé šesterečnou symetrii. Každý bazální obrazec se vyvíjí do opačného směru, jak je možné pozorovat na obrázku 7.



Obrázek 7. Nesymetrický růst zmrzlé vodní kapky. Ledové částice při teplotě a) -12, b) -15,1, c) -18,9 °C. Měřítka jsou rovno 50 μm. [3]

Stává se, že při růstu ledového krystalu má jedna část pyramidový tvar, kdežto druhá část je jiná, vrásčitá, nepravidelná. Na obrázku 8 je tento jev přesně vidět. Horní polovina je pravidelná s pyramidovým vzorem, a naopak dolní polovina krystalu je vrásčitá, kaskádovitá. Tato nesymetrie je způsobena rozdílnou vlhkostí obou částí krystalu.

V roce 1965 Kobayashi objevil krystaly s pyramidovým vzorem při teplotách pod -40 °C. Zdá se, že nízká teplota je příznivá pro vznik nestabilních krystalových tvarů. Poté, co se pyramidový tvar zvětší do pozorovatelné velikosti, se mění v plochý tvar s dutinou uprostřed. Hranolový vzor se se zvětšením spojuje s pyramidovým a růst pyramidového vzoru se zastavuje. Následně úplně zaniká a jako stopa po pyramidovém tvaru zůstává pouze dutina. Ale při tvorbě dutin záleží na vlhkosti. Během jiného experimentu, který prováděli pánové Gonda a Yamazaki nebyly dutiny vůbec pozorovány. Vlhkost byla dodávána v malém množství a růst zmrzlé vodní kapky byl pomalý. Důležitým faktorem, který ovlivňuje růst ledových krystalů je vlhkost. [3]



Obrázek 8. Ledový krystal kulovitého tvaru s rozdílným vzorem na vnější povrchu při teplotě -22 °C. Měřítka 50 μm [3]

## 2.4. Umělý sníh s přídatnými složkami

Pokud v tuto chvíli pomínou experimenty, nebo lépe řečeno výrobu sněhu jen pomocí vody, tak tu je druhá část tvorby umělého sněhu a to s přidávkem "cizích" látek. Těmi látkami jsou chemické složky, jako například soli, nebo i některé druhy bakterií, které zlepšují původní vlastnosti sněhu. Budu se věnovat hlavně směsím, které obsahují bakterie.

Odvětvím, kde se umělý sníh využívá je lyžování a zimní sporty obecně. V zimních střediscích se tato technologie používá více jak tři desetiletí. Se změnou klimatu a zvýšenými nároky na lyžování získává umělý sníh stále důležitější postavení. Ve střediscích, která nejsou vysoko položená a přírodní podmínky, jako jsou teplota a srážky, nedosahují očekávání, je umělé zasněžování takřka jedinou možností pro úspěšnou lyžařskou sezonu. Avšak masivní zasněžování může mít negativní dopady na okolí, ale o tom budu hovořit později. [2]

### 2.4.1. Přídatné složky

Obvykle je nutné, aby byla teplota během procesu nižší než  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pokud se do vody přidají ledové nukleáty, teplota potřebná k zasněžování se tím zvýší na  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nukleáty tvořily buď jodidové soli stříbra mědi nebo rtuti. Kvůli jejich negativnímu dopadu na lidský organismus a okolní přírodu se od těchto příměsí upustilo.

Pouzději se začaly používat bakteriální ledová jádra, tak zvaná biologická aditiva s částicemi "ice nucleation activity" INA. Získávají se z rostlin druhů *Pseudomonas*, *Erwinia* a *Xanthomonas*. Je to způsobeno proteinovým produktem jediného genu, který je ukotven ve vnější membráně bakteriální buňky. Tento protein hraje důležitou roli při vazbě molekuly vody na zárodek ledového krystalu a pomáhá k překonání termodynamických bariér při teplotách blízkých nule, aby došlo k tuhnutí a růstu sněhového krystalu. Nejrozšířenější variantou je Snowmax, který obsahuje zmrzlá susená jádra bakterie *Pseudomonas syringae*. [6]

### 2.4.2. Dopad na zdraví a životní prostředí

S výrobou umělého sněhu pomocí bakterií se objevily námitky, že by to mohlo mít negativní dopad na životní prostředí. Nejpoužívanější bakterií je *Pseudomonas syringae*. Při zkoumání bylo zjištěno, že se tato látka přirozeně vyskytuje a obecně žije ve spojení s rostlinami. Je to psychotrofní bakterie, která má optimální teplotu růstu mezi  $25$  a  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Na jednom hektaru zemědělské půdy může být až 1014 buněk. Ve sněhu dosahuje koncentrace okolo 105 buněk na litr. Na objem  $380\text{ m}^3$  se udává 300 g přídatné „mrazící“ látky. Po přepočtu by to znamenalo, že  $0,8\text{ g/m}^3$ . To by (podle studie Morrise a kol. z roku 2008) znamenalo, že tato voda obsahuje asi 106krát víc buněk *Pseudomonas syringae* než horská voda. [6]

Byl prováděn výzkum, který zjišťoval, zda takové množství nemůže působit negativně na zdraví lidí a zejména, jestli se neprojevuje infekcí, alergií či toxicitou. Výsledkem bylo, že tyto hodnoty na lidský organismus nemají zásadní vliv. *Pseudomonas syringae* se běžně vyskytuje, byť v daleko menším množství, třeba v obyčejné vodě a dokáže žít pouze do teploty  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mírné nebezpečí může nastat během manipulace s látkou v sypaném stavu a to konkrétně při styku s pokožkou nebo sliznicemi. Obsluha musí vždy dodržovat bezpečnostní pokyny.

Při tání umělého sněhu je půda nasycena vodou, která ještě potencionálně obsahuje patogenní mikroorganismy a může při nepříznivých podmínkách dojít k mírné kontaminaci vody a tím i ke snížení kvality vody v okolí lyžařského svahu. [6]

## 2.5. Princip umělého zasněžování v praxi

Umělý sníh se v reálném plném provozu vyrábí trochu jinak, než jak jsem popisoval například u experimentu s difuzní komorou. V praxi je důležitý výkon, co největší účinnost zasněžování a pokud možno za co nejnižší náklady. Budu tedy pokračovat u zasněžování lyžařských sjezdovek.

Ve většině případů se používají klasická sněžná děla, jaká jsou běžně k vidění podél sjezdovek. Vodní dělo je zkonstruováno tak, že má několik druhů okruhů s tryskami. Jeden druh trysek se nazývá nukleační a od ostatních se podstatně liší. Nukleační okruh se liší tím, že se v něm nachází menší počet trysek, například 12. U ostatních okruhů jich jsou desítky i stovky. Přes nukleační trysky prochází směs tlakové vody a vzduchu a proud, který z nich vylétá je nasměrován do středu tak, aby došlo k promíchání s ostatními proudy. Z trysek vylétují malé kapičky vody. Čím menší kapičky, tím rychleji zmrznou v sníh. Měly by být maximálně o velikosti řádově 100  $\mu\text{m}$ . Ideální stav je, když kapičky zmrznou ještě v letu, než



Obrázek 9. Detail trysek sněžného děla [16]

dopadnou na zem. Při teplotách pod  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  to v podstatě není zas takový problém. Horší to je, když jsou teploty vyšší. Kapičky tak nejčastěji ztuhnou jen částečně, respektive jsou stále dost mokré, ale po kontaktu se zemí díky teplotě pod bodem mrazu se konečně přemění na sněhový krystal. [16]

Tím, že jsou dopadající krystaly nasáklé vodou, tak se na sebe navzájem nabalují a vzniká umělý sníh. Aby se zefektivnil proces tuhnutí a růstu sněhového zrna, tak se sněžná děla otáčejí. To znamená, že dopadající krystalky nejsou hned zasypány novými, ale mají čas na dozrání. Je to z toho důvodu, že umělý sníh obsahuje větší množství vody v porovnání s přírodním sněhem. Voda, která se používá na umělé zasněžování je brána z potoků a řek. S tím se pojí i to, že obsahuje nečistoty. V tomto případě to ale není na škodu, nýbrž naopak. Nečistoty slouží jako zárodky sněhových jader. V pohledu z opačné strany, tedy z hlediska životního prostředí to však není nezávadné. [16] [17]

V tuto chvíli jsem zmínil pouze sněžná děla. Běžně se ale používají i dlouhé sněžné tyče, které pracují stejně jako sněžná děla, jen s tím rozdílem, že kapičky vody urazí od trysek

na povrch země větší vzdálenost. Tím se prodlužuje doba letu. K tvorbě sněhu dochází ještě ve vzduchu. [17]

V roce 2014 vyšel na trh prototyp zařízení Snowfactory. Jedná se doslova o revoluční metodu zasněžování. Umělý sníh se dá vyrábět až do teplot 35 °C. Od roku 2016 je součástí lyžařského areálu Moníneec. Je to o to zajímavější, že k výrobě umělého sněhu nejsou potřeba žádná aditiva. Speciální procedura zajišťuje, že sníh dokáže vydržet i při takto vysokých teplotách. Zařízení, ve kterém se sníh vyrábí, vypadá jako stavební buňka či nákladní kontejner. Uvnitř je ale vybavený tepelnými výměníky, filtry na čištění vody a dalšími součástmi. Voda, která je přiváděna do „kontejneru“ je zmrazena. Vytvářejí ledové šupinky, které mají při výstupu ze zařízení teplotu -5 °C. Šupinky obsahují oproti vzduchu méně vlhkosti. Pro vyrovnání rozdílu vlhkostí do sebe šupinky ledu nasávají vlhkost ze vzduchu. S přibývajícím vlhkostí dochází k růstu šupinek, nebo-li sněhových krystalů a vzniklý umělý sníh se stává trvanlivějším. Během 24 hodiny dokáže sněhová děla ze snowfactory nafoukat až 500 m<sup>3</sup> umělého sněhu. Oproti klasickým sněžným dělům jsou tyto energeticky náročnější. Spotřeba vody je však mnohem nižší u snowfactory. Klasická děla spotřebují přibližně 400 l vody za minutu, kdežto snowfactory „pouze“ 60 l za minutu. [18] [19]

I když jsem o několik řádek výše psal, že sníh se může vyrábět až do +35 °C, tak z ekonomického a provozního hlediska je to nesmysl. Maximální teploty, při nichž je výroba sněhu ještě reálná se pohybují okolo +10 až +15 °C. Nepřítelem pro umělý sníh je také samozřejmě déšť, který má na umělý sníh neblahý vliv. [18]

## 2.6. Joule-Thomsonův jev

Při tomto jevu dochází k nevratné expanzi plynů do prostředí s nižším tlakem. Obrázek 10 zachycuje podstatu věci. Mezi dvěma rovnoběžnými deskami se pohybuje adiabaticky izolovaný píst. Adiabaticky izolovaný znamená, že nedochází k úniku tepla ven ani dovnitř. Tento píst je rozdělen pórovitou přepážkou na dvě části tak, že levá strana o objemu  $V_1$  a tlaku  $p_1$  má teplotu  $T_1$  a strana napravo od přepážky o objemu  $V_2$  a tlaku  $p_2$  má teplotu  $T_2$ . Pokud na píst vyvineme tlakovou sílu ve směru doprava, dojde ke stlačení plynu uvnitř a ten je poté nucen přecházet přes pórovitou překážku do pravé části pístu. Touto akcí dochází ke změně objemu v levé části o  $\Delta V_1$  a analogicky v pravé části o  $\Delta V_2$ . [8]



Obrázek 10. Joule-Thomsonův jev [8]

Při stlačování plynu v levé části pístu vykonáváme práci a vynakládáme energii  $E_1$ . Na druhé straně dochází k expanzi, při které se uvolňuje energie  $E_2$ . Tyto energie jsou stejně velké. Můžu tedy napsat rovnici:



$$E_1 - E_2 = p_1V_1 - p_2V_2 \quad (1)$$

To znamená rovnost entalpií  $H_1 = H_2$  a tedy, že entalpie je konstantní. [8]

### Definice entalpie:

„Dodáme-li do systému, jehož objem je konstantní, určité teplo, bude objemová práce nulová a změna vnitřní energie systému bude rovna dodávanému teplu“. Mezi zařízení, které takto pracují, patří uzavřené nádoby, autoklávy, zásobníky plynů nebo kapalin apod. Nežádka se objevují zařízení, které pracují s konstantním tlakem. Například válec s pístem. To však není tento případ, kdy je naopak změnu tlaku hlavní podstatou. [9]

Joule-Thomsonův jev není pouze o změně objemu jednotlivých částí uzavřené nádoby. Je to zejména o rozdílných tlacích a změně teploty. Když stlačujeme levou stranu pístu, tak dochází k nárůstu tlaku, který se dostává přes pórovitou přepážku a za ní náhle expanduje do pravé části. Dojde tedy k rychlému poklesu tlaku a zároveň i změně teploty. Jestli se teplota sníží, nebo naopak zvýší, závisí na plynu, který je uvnitř nádoby. Pokud je vnitřním médiem například dusík, tak po expanzi se teplota sníží. Jestliže je uvnitř vodík, dojde k jeho ohřátí. [10]

Reálný plyn jde přibližně nahradit také Van der Waalsovým plynem, pro který platí tato rovnice

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right) \cdot (V_m - b) = RT \quad (2)$$

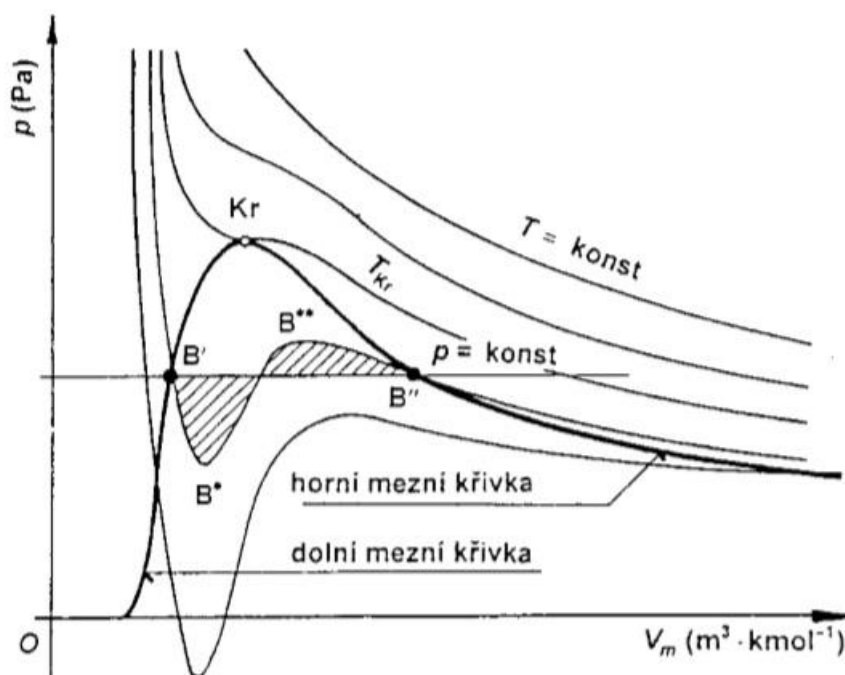
$V_m$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}$ ] značí kilomolový objem, konstanta  $b$  vyjadřuje tzv. náhradní objem zaujatý molekulami [ $\text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}$ ]. Vliv mezimolekulových sil je do rovnice zahrnut tím, že k tlaku  $p$  je přičten kohezní tlak

$$p_{koh} = aV_m^{-2} \quad (3)$$

v němž součinitel  $a$  závisí na druhu plynu. Kohezní tlak je způsoben jednostranným silovým působením z vnitřku tekutiny na molekuly na hranicích soustavy a nelze zjistit žádným vloženým takovým čidlem, protože to se samo stává součástí hranice. [14]

Stav, kdy  $V_m$  jde k nekonečnu, je pro velmi řídké plyny. V tomto případě přejde rovnice 2 ve stavovou rovnici ideálního plynu.

V diagramu na obrázku 11 je soustava izoterm. V horním pravém rohu diagramu se izotermy přibližují rovnoosým hyperbolám. Pokud se teplota stále snižuje, mění se tvar křivek a postupně se blíží k tzv. kritické izotermě. Ta odpovídá kritické teplotě  $T_{kr}$ .



Obrázek 11. Mezní diagram [14]

Z obrázku je vidět, že diagram je rozdělen na několik částí. Nebo lépe řečeno mezní křivka je rozdělena na dolní mezní křivku a horní mezní křivku. Průsečíkem těchto křivek je kritický bod, který odpovídá kritické teplotě. V tomto bodě existuje kritický stav typický pro každou látku. Látka má v tomto bodě svůj kritický tlak a vyplňuje kritický objem. Pokud začnu u dolní mezní křivky, tak nalevo od ní je látka v kapalném stavu. Dolní mezní křivka je také označována jako křivka syté kapaliny, nebo se také nazývá mez varu. Mezi dolní a horní mezní křivkou je oblast, ve které „se nachází kapalina i plyn“. Tato oblast má název mokrá pára. Horní mezní křivka je též označována jako mez sytosti, nebo také křivkou přehřáté páry. Napravo od horní mezní křivky je oblast zvaná přehřátá pára, jedná se tedy o látku v plynném stavu. Nad kritickým bodem již není rozdíl mezi fázemi. Kapalina tak přechází v plyn bez značného přechodu. V této oblasti ani nedochází k varu. Tvar izotermy se při změnách teploty a tlaku mění. Pokud teplota se zvyšuje a přitom klesá tlak, tak se izoterma tvarem přibližuje k rovnoosé hyperbole, která již popisuje vlastnosti ideálního plynu. Izoterma, která prochází body  $B'$  a  $B''$  a v oblasti mokré páry není konstantní, se nazývá van der Waalsova. Zatímco skutečná izoterma je znázorněna mezi těmi dvěma body přímkou. Vyšrafované části v oblasti mokré páry jsou stejně velké. [14] [15]

Konstanty, které se objevují v rovnici (2), tedy konstanty  $a$ ,  $b$ , se dají stanovit takto:

$$a = \frac{27R^2T_{kr}^2}{64p_{kr}}, \quad a = \frac{9RV_{kr}T_{kr}}{8} \quad (4)$$

$$b = \frac{1}{8} \frac{RT_{kr}}{p_{kr}}, \quad b = \frac{V_{kr}}{3} \quad (5)$$

Takto lze vypočítat konstanty a, b jedné složky. V praktické části ale počítám se směsí tří plynů, a celkové konstanty směsi se určí z těchto vztahů:

$$a = \sqrt[3]{a_1 a_2 a_3} \quad (6) \quad \sqrt[3]{b_1 b_2 b_3} \quad (7)$$

Teoreticky by Van der Waalsova rovnice měla platit pro všechny plyny. Avšak při výpočtech vychází hodnoty s několikaprocentní chybou. V praxi se proto více uplatňuje rovnice Redlichova – Kvingova.

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - a \frac{1}{\sqrt{T} V_m (V_m + b)} \quad (8)$$

Když se vrátím k samotnému Joule-Thomsonovu efektu, tak je nejdůležitější tzv. Joule-Thomsonův koeficient  $\mu_{JT}$ . Tento koeficient je závislý na změně teploty a tlaku a je definován takto:

$$\mu_{JT} = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_H, \text{ tedy vyjádřeno bez derivací: } \mu_{JT} = \frac{T_2 - T_1}{p_2 - p_1} \quad (9)$$

Jak už jsem zmiňoval,  $T_1$  a  $p_1$  jsou hodnoty před expanzí a hodnoty  $T_2$  a  $p_2$  jsou hodnoty po expanzi. Pro ideální plyny je J-T koeficient roven nule. U reálných plynů je buď menší než nebo větší než nula.

Pokud je  $\mu_{JT} < 0$ , koeficient se nazývá záporný a plyn se po expanzi ohřívá. Vyplývá z toho, že:

$$dT > 0, \quad dp < 0.$$

V opačném případě, kdy je  $\mu_{JT} > 0$ , tak je koeficient kladný, po expanzi se teplota plynu sníží. Z toho vyplývá, že:

$$dT < 0, \quad dp < 0.$$

Ve zvláštních případech však může nastat situace, že je J-T koeficient nulový. Poté je teplota  $T_1$  a  $T_2$  konstantní. Stav  $\mu_{JT} = 0$  odpovídá inverzní teplota. Zaměřím-li se pouze na plynné skupenství, tak každá látka má pouze jednu inverzní teplotu, ta nastává při určitém tlaku. Pokud má látka nižší teplotu, než je teplota inverzní, pak se při stlačování ochlazuje. Naopak, když stlačování probíhá za vyšší teploty, než je inverzní teplota, pak plyn svoji teplotu po expanzi zvýší. Pro  $\mu_{JT} = 0$  vyplývá:

$$T_i = \frac{2a}{Rb} \quad (10)$$

Vztah mezi inverzní a kritickou teplotou vypadá takto:

$$T_i = 6,75 T_k \quad (11)$$

Jelikož během v úprav diferenciálních rovnic bylo provedeno několik zjednodušení, je tento vztah přibližný. Ale pro orientační výsledky a ne příliš vysoké tlaky je dostačující.

Zjednodušený vztah pro výpočet J-T koeficientu, který využiju v praktické části, vypadá následovně:

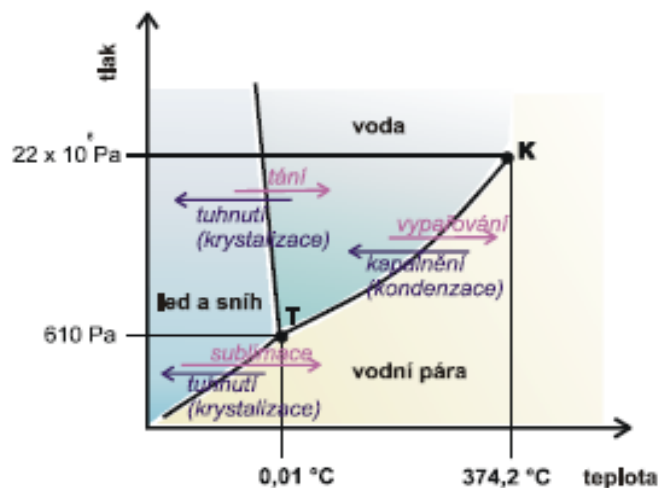
$$\mu_{JT} = \frac{\frac{2a}{RT} - b}{c_{pm}} \quad (12)$$

V tabulce 1 jsou konstanty a, b pro některé látky. Jsou tu uvedeny i konstanty pro vzduch. V praktické části tyto hodnoty nevyužiju, napočítám je pro moji variantu ze vzorečků (4) a (5).

Látka	Vzorec	a [Pa m <sup>6</sup> mol <sup>-2</sup> ]	b.10 <sup>5</sup> [m <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> ]
Argon	Ar	0,136184	3,21823
Chlór	Cl <sub>2</sub>	0,634483	5,42285
Fluór	F <sub>2</sub>	0,116381	2,87413
Vodík	H <sub>2</sub>	0,024785	2,66037
Helium	He	0,00346068	2,37622
Krypton	Kr	0,232511	3,95693
Dusík	N <sub>2</sub>	0,137016	3,86905
Neon	Ne	0,020831	1,67193
Kyslík	O <sub>2</sub>	0,138188	3,18573
Vzduch		0,135952	3,65509
Oxid uhelnatý	CO	0,14724	3,94783
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	0,365323	4,28008

Tabulka 1: Konstanty a, b [19]

Na obrázku 12 je fázový diagram vody. Diagram je rozdělen několika křivkami na jednotlivé oblasti. V závislosti na tlaku a teplotě dochází k přecházení mezi oblastmi



Obrázek 12. Fázový diagram vody [16]

a tím ke změnám skupenství. V diagramu jsou dva důležité body. Bod T, kterému se říká trojný bod, je takový, ve kterém se stýkají všechny tři skupenství. Při teplotě 0,01 °C a tlaku 610 Pa může být voda ve formě tuhé, kapalné i plynné. Bod K je kritický bod a jeho význam jsem již zmiňoval u předchozího mezního diagramu.

## 2.7. Stanovení Joule-Thomsonova koeficientu při laboratorním experimentu

Jedná se o laboratorní úlohu VŠCHT, ve které se využívá Joule-Thomsonova jevu, který jsem popsal výše. V tomto případě sice aparatura bude vypadala trochu jinak, než je obrázek 10, ale princip zůstává stejný. [10]

### 2.7.1. Popis aparatury:

K pokusu je zapotřebí mít tlakovou lahev (zkráceně TL) s redukčním ventilem RV, který dodává plynný dusík neb oxid uhličitý. Na redukčním ventilu je šroub Š a ventil VVP. Dále spojovací pružné hadice SPH a samotný Joule-Thomsonův přístroj JTP s ručičkovým manometrem a elektrickými teploměry ET1 a ET2. Skrz tento přístroj proudí plyn, jehož vlastnosti poté měřeny. Mezi teploměry je frita. Frita může být onou pórovitou přepážkou. Také by se mohla použít například tryska, kapilára, nebo redukční ventil. Poslední částí je elektrická jednotka EJ. [10]

### 2.7.2. Pracovní postup:

Před začátkem měření je zapotřebí zkontrolovat, zda jsou elektrody elektrických teploměrů ET1 a ET2 zapojeny do přístroje ve správné poloze. Sonda ET2 musí být nastavena



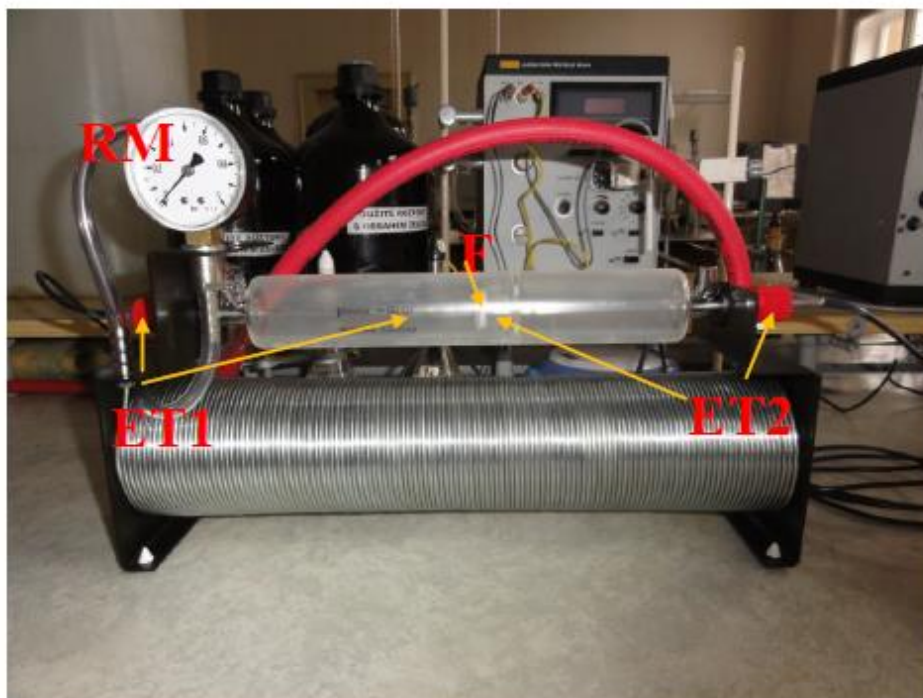
Obrázek 13. Celkový pohled na aparaturu: TL - tlaková láhev s plynem, SPH - spojovací pružná hadice, RM - ručičkový manometr, RV - redukční ventil, ET1 a ET2 - elektrické teploměry, JTP - přístroj na měření Joule-Thomsonova koeficientu [10]

tak, aby její konec byl maximálně půl centimetru od frity F, ale zároveň se jí nesmí dotýkat. Při této manipulaci je potřeba postupovat velmi opatrně, aby nedošlo k poškození křehké skleněné části. Následně je spuštěna elektrická jednotka EJ. Elektrická jednotka musí být přepnuta do módu přímého měření rozdílu teplot. Než se přede k uvolnění plynu z tlakové lahve, tak je nutné, aby hodnota pracovního tlaku na pravém budíku, který je na redukčním ventilu, byla nulová. Až v tento moment se může otevřít hlavní uzávěr na tlakové lahvi a nastavit pomalým otáčením šroubu Š pracovní tlak. Pracovní tlak se nastaví tak, že se sleduje hodnota tlaku na manometru RM. Hodnoty tlaku mohou být různé, záleží na konkrétním zadání. V tomto případě má ručičkový manometr RM na přístroji JTP ukazoval hodnotu 0,9 bar. Tato hodnota udává, jaký je rozdíl tlaků před a za fritou. A hodnota 0,9 přibližně odpovídá tlaku 6-7 bar na pracovním budíku redukčního ventilu RV. Poté se uvolní ventil VVP a aparaturu je pak nutné nechat přibližně 15 minut stabilizovat. [10]

Při tomto pokusu je důležité, aby aparatura a hlavně přístroj JTP nebyl vystaven situacím, kdy by mohlo dojít k jeho ohřátí nebo ohlazení. Výrazně by tak mohly být ovlivněny naměřené hodnoty. Po 15 minutách stabilizace se postupně snižuje tlak až na nulu po daných intervalech a zaznamenají se teploty, respektive jejich rozdíl před a za fritou následně i rozdíl tlaků z manometru na přístroji JTP. Poté následuje povolení šroub Š, aby tlak na manometru klesl na nulu. [10]



Obrázek 14. Detail redukčního ventilu RV s napojením na tlakovou lahev TL, VVP – ventil výstupního plynu o nastaveném pracovním tlaku, HV – hlavní ventil tlakové lahve, Š – šroub k nastavování pracovního tlaku [10]



Obrázek 15. Detail přístroje JTP, F - frit, ET1 a ET2 - elektrické teploměry měřící teplotu plynu před a za fritou, RM - ručičkový manometr [10]

## 3. Praktická část

---

V praktické části se zaměřuji na návrh zařízení na tvorbu umělého sněhu. V této práci představuji dva konstrukční návrhy. Obě zařízení jsou stavěna spíše pro domácí využití. Na zasněžování sjezdovek by to nestačilo. První varianta je jednodušší. Druhá je více sofistikovaná.

Druhou částí je generátor sněhu ve větrném tunelu v Telči. Je to ukázka toho, že umělý sníh se nepoužívá pouze na zasněžování sjezdovek.

Dále uvedu výpočty na Joule-Thomsonův jev. Z rovnic, které jsem zmiňoval výše nejprve vypočítám konstanty van der Waalovy rovnice. V druhém kroku spočítám J-T koeficienty pro teploty od +10 do -10 °C. Následně určím, na jaké teploty se bude vzduch po expanzi ochlazovat. Tato vlastnost se dá při výrobě umělého sněhu využít. Znamená to, že by při kompresi a následné expanzi vzduchu mohla teplota vzduchu klesnout například z +3 °C na -4 °C. Běžně se sice tento jev nevyužívá, avšak jeho aplikace se nabízí jako zajímavá varianta.

### 3.1. Návrh zařízení pro tvorbu umělého sněhu

#### 3.1.1. SG3 E-Type

Jedná se o zařízení s označením SG3 E-Type (external mix) Snowmaker, nebo-li vnější zasněžovač. Tato sestava, jak je vidět na schématu obrázku 17 vypadá poměrně jednoduše. Dalo by se říct, že stačí mít kompresor, čerpadlo a potrubí a můžete si doma vyrábět umělý sníh. Tak jednoduché to ale není. Je nutné dodržet několik bodů ať už při konstrukci, či výběru materiálů a součástek. [7]

## Konstrukční řešení

Variant uspořádání zařízení může být více.

- **Technické parametry**

- Čerpadlo o průtoku 5 až 6,5 l/min
- Voda v trubce/hadici pod tlakem 8,3 až 12,4 MPa
- Kompresor o minimálním průtoku 152,9 l/min vzduchu a tlaku 620,1 kPa

Celé kouzlo zasněžovače SG3 E-Type ční ve dvou trubkovém vedení, kompresoru a vodního čerpadla. Nejčastěji se používají trubky o průměru 3 mm nebo 6,5 mm. Místo trubek mohou být použity i hadičky. Napojovat trubky lze pomocí šroubení. Šroubení by také mělo být omotáno teflonovou páskou, která slouží jako těsnící element. [7]

- **Potrubní systém**

Jak jsem již zmiňoval, použijeme 3, nebo 6,5 mm trubky, dále šroubení se závity NPT, což je označení pro kuželový trubkový závit podle normy ASME/ANSI. [11]

Při návrhu potrubí je důležité myslet na to, aby bylo schopno přenášet média o navržených tlacích a průtocích. V tomto případě navrhuji trubky o průměru 6,5 mm. [7]

- **Trysky**

Trysková hlava, jak je vidět na obrázku, ukončuje potrubní vedení. Hlava je vyrobena z hliníku 0,063 o rozměru 7,5x7,5 mm. [7]

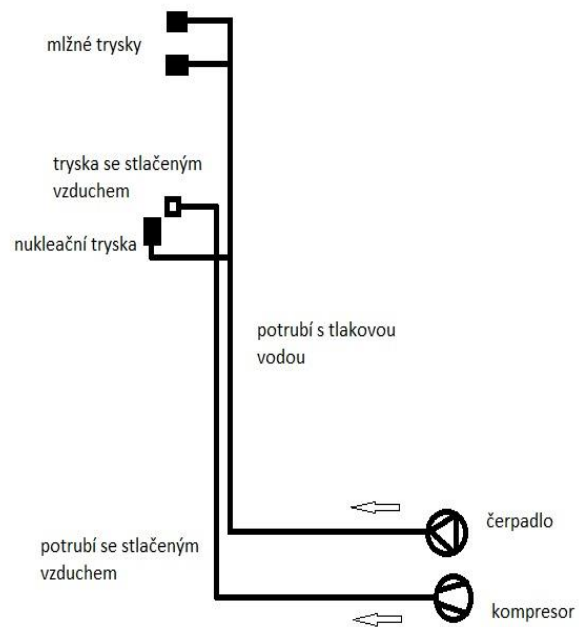
Ke správné funkci zasněžovače S3 E-Type je nutné, aby vnější trysky byly namontovány ve správném rozmístění. V návrhu jsou 2 horní mlžné trysky, nukleační tryska a tryska, kterou proudí vzduch. Vzdálenost mezi tryskami by měla být 180 mm. Zařízení lze sestavit i bez mlžných trysek. V tom případě je zapotřebí vyvrtat malou díрку v uzávěru potrubí. Proud vzduchu vycházející z vyvrtaného otvoru musí svírat s nukleační tryskou úhel 90°. Do nukleační trysky je potrubím přiváděna tlaková voda. Nukleační tryska je pevně uchycena šroubení. [7]

Na obrázku 16 je již zasněžovací proces.





Obrázek 16. Na obrázcích je vidět tryska, kterou je vstříkována voda a otvor, kterým proudí vzduch. Na dolním obrázku je tvorba sněhu [7]



Obrázek 17. Schéma zařízení

### 3.1.2. SG6 Xstream

Technické parametry jsou podobné jako u předchozího zařízení, avšak SG6 Xstream je výkonnější. Obrázek 18 toto zařízení zobrazuje.

#### Konstrukční řešení

- **Technické parametry:**

- Vodní čerpadlo s průtokem 5 až 10 l/min
- Proudící voda je natlakovaná až na 27,5 MPa
- Vzduchový kompresor dodává 9,2 m<sup>3</sup>/h, v přepočtu 150 l/min vzduchu

Hlava je vyrobena z eloxovaného hliníku. Ta slouží jako chladicí část. Ochlazuje vodu a reguluje množství vyrobeného sněhu.

- **Potrubí**

Do tryskové hlavy vedou dvě hadice o průměru 6,35 mm. Jedna slouží k dopravě vody, druhá k dopravě vzduchu. Jsou 3 metry dlouhé a dimenzované na 20,5 MPa.

Rám zasněžovače SG6 Xstream má neobvyklou geometrii. Úhel nastavení tryskové hlavy je nastavitelný. Nohy lze snadno namontovat i odmontovat. Trubky rámu jsou o průměru 50 mm

- **Trysky**

Vzduchová tryska i nukleační tryska je z nerezové oceli



Obrázek 18. Zasněžovač SG6 Xstream

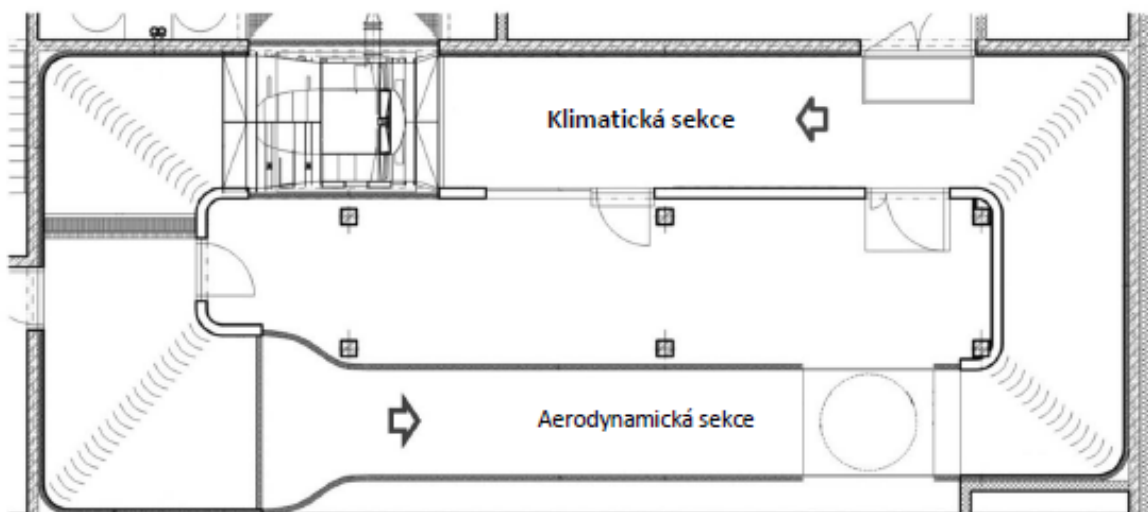
Princip tohoto zařízení je podobný jako u SG3 E – Type. Do tryskové hlavy je přiváděn vzduch a tlaková voda. Koncové trysky opět pod přesně daným úhlem rozstříkují vodu, která je proudícím vzduchem unášena do okolí, resp. vodní kapičky. Rozprášené vodní kapičky tvarem připomínají kužel. SG6 Xstreme dokáže za hodinu vyrobit 2,56 m<sup>3</sup> umělého sněhu.

### 3.1.3. Generátor sněhu ve větrném tunelu

V roce 2017 byl v klimatickém větrném tunelu v Telči proveden experiment na tvorbu generátoru sněhu. Větrný tunel je navržen tak, aby zde bylo možné zkoumat vlastnosti a chování předmětů a soustav z oblastí aerodynamiky fyziky, meteorologie, nebo preventivní ochrany. V Telči je postaven větrný tunel typu Göttingen. Tento typ se vyznačuje tím, že má uzavřený kruhový okruh. Dále je specifický tím, že vzdálenost mezi ventilátorem a úsekem měření je velmi velká. Výhodou tohoto typu je nižší potřebný výkon ventilátoru. [12][13]

Klimatický větrný tunel v Telči je rozdělen na dvě části. První část, nebo-li pracovní sekce, je „aerodynamicky uzpůsobena k aerodynamickému měření účinku větru na konstrukce“ a druhá pracovní sekce je klimatická. To znamená, že se využívá k „synergickému modelování klimatických faktorů jako je teplota, dešť, mráz i sálavé teplo“. Na obrázku 19 je vidět schematický půdorys. Při budování větrného tunelu se příliš nepočítalo se testováním tvorby sněhu. Proto se musely pracovní podmínky trochu upravit.

Generátor sněhu byl zkoušen v pracovní sekci. Ta je o šířce 2,5 m, výšce 4 m a délce 9 m. V této části větrného tunelu je maximální dosažitelná rychlost větru až 72 km/h. Rychlost se odvíjí od polohy vertikálně pohyblivého stropu a pohyblivé klapky. Ventilátor dosahuje výkonu 200 kW. Teploty, které se dají v klimatické části dosáhnou se pohybují od -10 do +30 °C.

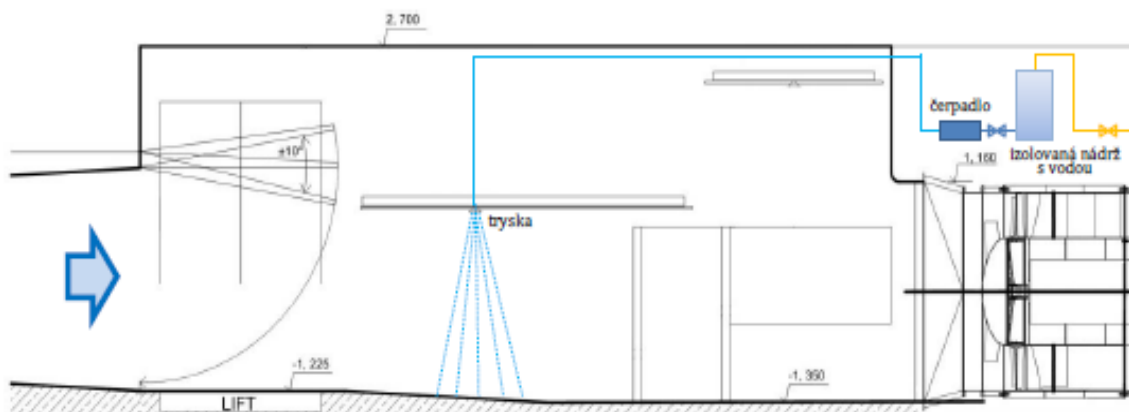


Obrázek 19. Schéma větrného a klimatického tunel [12]

#### 3.1.3.1. Zárodky sněhových vloček

Jelikož v původním záměru nebylo zkoumání sněhu, muselo se experimentovat. V prvním pokusu byl použit systém pro tvorbu dešťových kapek. Voda ze zásobníku putovala přes čerpadlo a potrubí do trysek, které vytváří kapky o průměru 0,5 až 8 mm. Celý proces

se řídí čerpadlem, respektive měnícím se tlakem vody v potrubí. Na obrázku 20 je vidět detailní popis klimatické sekce. [12]

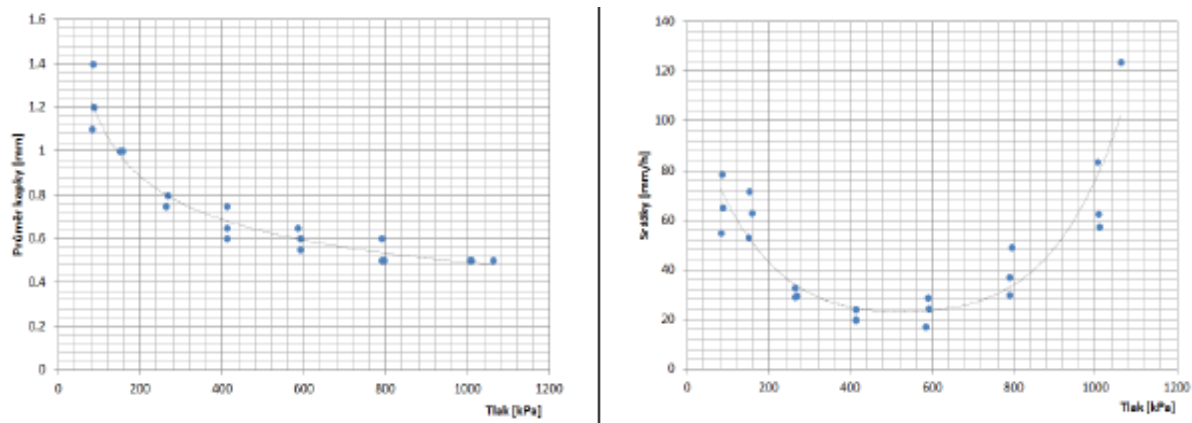


Obrázek 20. Podélný řez klimatické sekce při tvorbě dešťových kapek [11]

Pro tvorbu sněhu je vhodný co nejmenší průměr trysky. Byl proveden pokus s tryskou o průměru  $0,3$  mm. Tlak vody, byl řízen čerpadlem a pohyboval se v rozmezí od  $100$  do  $1100$  kPa. Při změně tlaku se měnila velikost průměru kapky a také objem srážek. Závislosti jsou popsány v grafech na obrázku 21.

Při samotném experimentu tvorby sněhu byla použita tryska o průměru  $0,5$  mm, teplota vzduchu  $-10$  °C a rychlost vzduchu  $3,0$  m/s, nebo-li  $10,8$  km/h. Za těchto podmínek sníh nevznikal. Čas výskytu vodní kapky v chladném prostředí byl příliš krátký a kapka nestačila zmrznout.

Po této zkušenosti byl zkonstruováno zařízení, které funguje na podobném principu, jako generátor, které jsem popisoval výše. Jedná se o bednu, do které je shora vyvedena tryska o průměru  $0,3$  mm. Touto tryskou proudí voda. Z boku je přivedena druhá tryska, kterou proudí



Obrázek 21. Závislost průměru kapek a množství srážek na tlaku

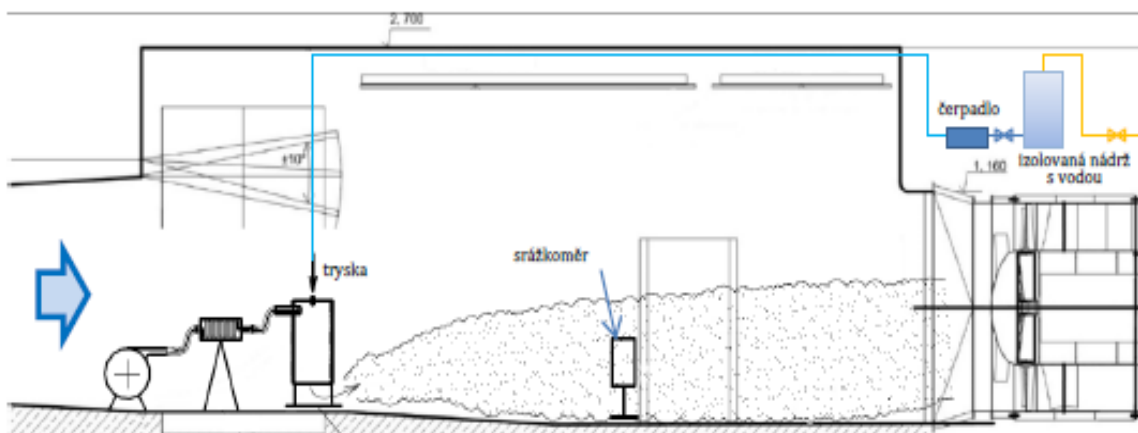
vzduch o teplotě  $-20$  °C. Bedna je z části otevřená a proudí do ní vzduch o stejných vlastnostech jako při prvním pokusu, tedy o teplotě  $-10$  °C a rychlosti  $10,8$  km/h.

Aby měl vzduch přicházející tryskou teplotu  $-20$  °C, tak musí být vychlazen. K tomu slouží chladicí box. Chladicí box se skládá ze sady desek, namontovaných sériově a stažených pomocí svarů mezi hlavní a přítlačnou deskou. Je vyroben z polystyrenu o tloušťce stěny  $20$  mm. Přitékající vzduch proudí mezi deskami, které jsou mezi sebou vzájemně odizolovány. Přitékající vzduch má na začátku chladicího boxu teplotu  $+22$  °C. Uvnitř boxu jako chladivo použit suchý led, který má teplotu  $-73$  °C. Vzduchu, jenž vystupuje z chladicího boxu má

výslednou požadovanou teplotu  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Průtočný objem chlazeného vzduchu je  $0,004\text{ m}^3/\text{s}$ . Po tomto nastavení, již byla produkována sněhová zrna. Není to však stále zařízení, které je uzpůsobené k tvorbě většího množství sněhu. [12]

### 3.1.4. Modifikace zařízení na tvorbu sněhu

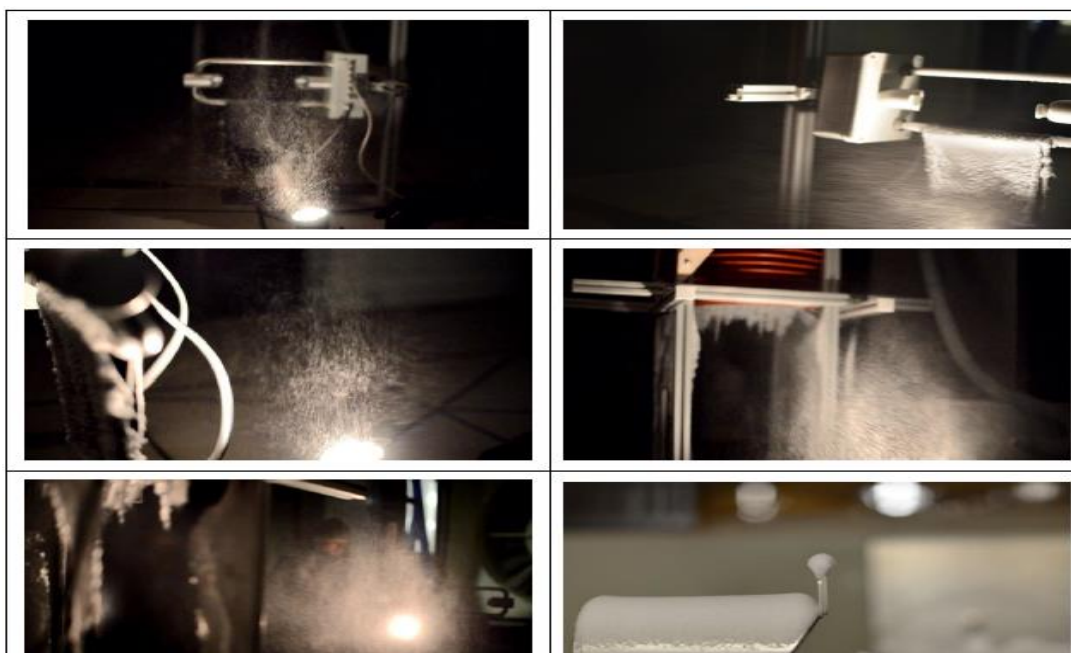
Tato úprava spočívá „v principu spirálové rotace vzduchu ve vnitřním prostředí generační komory“. Vzduch proudí z upravené generační komory i se zamrzající vodní kapkou. Kolem kapky se vytvářejí víry, které ustávají až při zmrznutí kapky ve sních. Vzduch kolem zmrzlé kapky se je teplejší a stoupá vzhůru. Schéma zařízení v klimatické sekci je na obrázku 22.



Obrázek 22. Schéma uspořádání generační komory v klimatické sekci [12]

Generační komora je v tomto případě jakýsi válec, zespoda otevřený. Do horní části je přes trysku o průměru  $0,3\text{ mm}$  přiváděna voda a přes druhou trysku přiváděn podchlazený vzduch na teplotu  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Trysky jsou vůči sobě pootočené od  $90^{\circ}$ . Rychlost a teplota okolního vzduchu byla ponechána na původních hodnotách.

Na obrázku 23 je vidět výsledek experimentu. Dosáhlo se zkvalitnění sněhového zrna a také k ustálení procesu tvorby sněhu.



Obrázek 23. Příklady tvorby sněhu v generační komoře v klimatické sekci [12]

## 3.2. Výpočet Joule-Thomsonova jevu a jeho využití

V teoretické části jsem popsal k Joule-Thomsonovu jevu. V této kapitole uvádím několik zjednodušených výpočtů, na kterých se pokusím ukázat, jak by sel dal právě tento jev využít v praxi na výrobu umělého sněhu. Rovnice, které zde používám jsou zjednodušené a výsledky jsou přibližné. Avšak pro nastínění a ukázkou toho, jak by to mohlo vypadat, je to dostačující.

Nejprve jsem si vypočítal konstanty Van der Waalsovy rovnice a, b. Při výpočtu jsem uvažoval vzduch, který je složen z dusíku, kyslíku a argonu a to tímto způsobem:

$$N_2 = 78,5 \%, \quad O_2 = 21 \% \quad \text{a} \quad Ar = 0,21 \%$$

Zanedbal jsem například CO<sub>2</sub>. První zjednodušení je už v tomto kroku.

Pro výpočet konstant jsem použil rovnice (4) a (5)

$$a_i = \frac{9RV_{kri}T_{kri}}{8} \quad \text{a} \quad b_i = \frac{V_{kri}}{3}$$

Hodnoty R, V<sub>kr</sub>, T<sub>kr</sub> jsem našel v tabulkách [21] :

- N<sub>2</sub> – T<sub>kr</sub> = 126,20 K      V<sub>kr</sub> = 0,09010 m<sup>3</sup>/kmol      R = 296,84 J/kmol
- O<sub>2</sub> - T<sub>kr</sub> = 154,58 K      V<sub>kr</sub> = 0,07337 m<sup>3</sup>/kmol      R = 259,83 J/kmol
- Ar - T<sub>kr</sub> = 150,86 K      V<sub>kr</sub> = 0,07457 m<sup>3</sup>/kmol      R = 208,12 J/kmol

Konstanty a, b pro vzduch jsem vypočítal ze vztahů (6) a (7).

$$a = \sqrt[3]{a_{N_2} a_{O_2} a_{Ar}} \quad [m^3 KJ/kmol^2] \quad b = \sqrt[3]{b_{N_2} b_{O_2} b_{Ar}} \quad [m^3/kmol]$$

Prvek	Konstanty	
	a	b
N <sub>2</sub>	3,79716	0,030033
O <sub>2</sub>	3,31523	0,024457
Ar	2,63393	0,024857
vzduch	3,21262	0,026332

Tabulka 2. Vypočítané konstanty a, b

Když jsem měl k dispozici Van der Waalsovy konstanty, pustil jsem se do výpočtu Joule-Thomsonova koeficientu. J-T koeficient jsem počítal podle zjednodušeného vztahu, který je pod označením (10).

$T_1$ [K]	$\mu_{JT}$ [K/kPa]
283,15	1,81090E-03
282,15	1,82054E-03
281,15	1,83023E-03
280,15	1,83999E-03
279,15	1,84983E-03
278,15	1,85970E-03
277,15	1,86971E-03
276,15	1,87975E-03
275,15	1,88987E-03
274,15	1,90006E-03
273,15	1,91033E-03
272,15	1,92383E-03
271,15	1,93426E-03
270,15	1,94159E-03
269,15	1,95217E-03
268,15	1,96285E-03
267,15	1,97356E-03
266,15	1,98437E-03
265,15	1,99527E-03
264,15	2,00625E-03
263,15	2,01731E-03

Tabulka 3. Vypočítané hodnoty J-T koeficientu v závislosti na teplotě

Abych byl vůbec schopný vypočítat  $\mu_{JT}$  potřeboval jsem molární tepelnou kapacitu vzduchu za konstantního tlaku  $c_{pm}$ . Pro vzduch jsem ji zvolil konstantní i při změně teploty od +10 do -10 °C.

Teplotu  $T$ , kterou považuji za  $T_1$ , nebo-li za teplotu okolí, jsem snižoval vždy po 1 K. Začal jsem na 283,15 K a postupně se dostal až na teplotu 263,15. Což je -10 °C. Mým záměrem bylo sestrojít křivku, která bude zachycovat závislost  $\mu_{JT}$  a teplotě. Se snižující se teplotou totiž



J-T koeficient nepatrně roste. V tomto teplotním rozmezí je nárůst 0,0002 K/kPa. Na obrázku 24 je graf s touto závislostí. Rovnice přímky je:  $y = 0,0103x + 1,7984$

Dále jsem pokračoval ve výpočtech a mým cílem bylo najít pro daný J-T koeficient, tedy i danou teplotu  $T_1$ , vhodný tlakový pokles tak, aby konečná teplota  $T_2$  byla nižší, než  $-4\text{ °C}$ . Nebo-li stlačit vzduch na takový tlak, aby se při expanzi snížila teplota vzduchu na  $-4\text{ °C}$ . Vzduch o této teplotě by proudil z trysky a zmrazoval kapičky vody vylétávající z druhé trysky. Vytvářel by se tak umělý sníh.

Nyní už uvažuji teploty pouze od  $+5\text{ °C}$  níže. Pro konečný výpočet použiji vztah (7)

$$\mu_{JT} = \frac{T_2 - T_1}{p_2 - p_1} = \frac{\Delta T}{\Delta p}$$

J-T koeficient mám spočítaný, teplotu  $T_1$  znám a mám zvolený i rozdíl teplota. Vyjádřím tedy teplotu  $T_2$ .

#### Výchozí hodnoty:

- **Změna tlaku  $\Delta p$**  = 100 kPa; 500 kPa; 1000 kPa; 2000 kPa; 3000 kPa, 8000 kPa; 10000 kPa

- **Teplota  $T_1$**  =  $+5\text{ °C}$ ;  $+4\text{ °C}$ ;  $+3\text{ °C}$ ;  $+2\text{ °C}$ ;  $+1\text{ °C}$ ;  $0\text{ °C}$ ;  $-1\text{ °C}$ ;  $-2\text{ °C}$ ;  $-3\text{ °C}$ ;  $-4\text{ °C}$ ;  $-5\text{ °C}$

Je zřejmé, že čím menší bude teplota  $T_1$ , tím menší tlaková diference bude zapotřebí k dosažení cílové teploty  $T_2$ . Pro teploty vyšší než  $+5\text{ °C}$  jsem výpočet neuvažoval. Sníh by při vyšších teplotách hůř udržoval a energie vynaložená na tvorbu pravděpodobně příliš vysoké. I při  $+5\text{ °C}$  je nutné natlakovat vzduchu přibližně na 5 MPa, aby výstupní teplota vzduchu byla  $-4\text{ °C}$ . V těchto výpočtech předpokládám skokovou změnu teploty při expanzi vzduchu.

V tabulce 4 jsou sepsané výsledné teploty po expanzi, na které se vzduch teoreticky ochladí. Od teploty  $T_1 < 3\text{ °C}$  jsem počítal se změnou tlaku  $\Delta p$  jen do 5 MPa. Udělal jsem to z toho důvodu, že mi přišly hodnoty dostačující. Při  $\Delta p = 8000$  a  $10000\text{ kPa}$  je výsledná teplota  $T_2$  již hodně nízká.

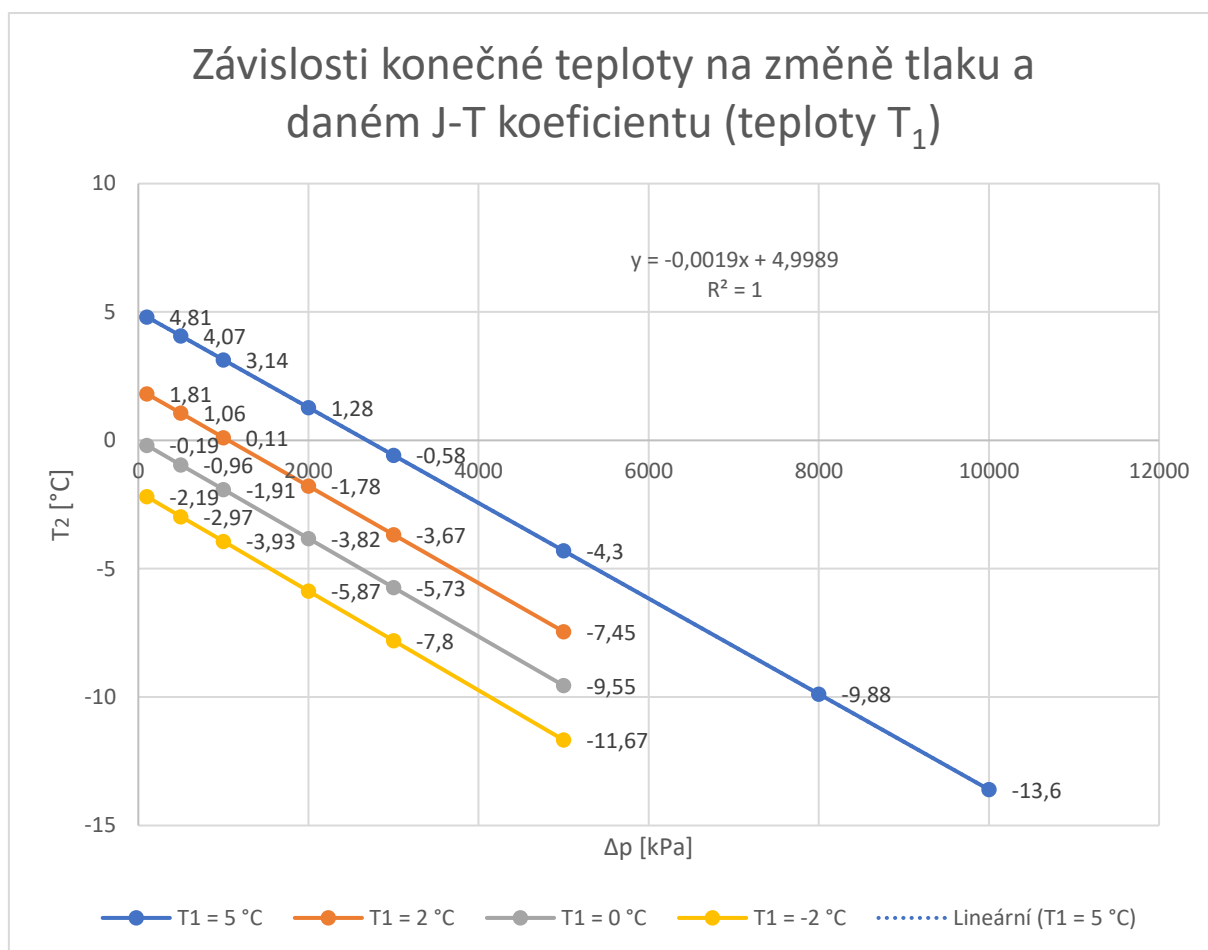
$\Delta p$ [kPa]	Vstupní teplota $T_1$ [°C]										
	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5
100	4,81	3,81	2,81	1,81	0,81	-0,19	-1,19	-2,19	-3,19	-4,2	-5,2
500	4,07	3,07	2,06	1,06	0,06	-0,96	-1,96	-2,97	-3,97	-4,98	-5,98
1000	3,14	2,13	1,1	0,11	-0,89	-1,91	-2,92	-3,93	-4,94	-5,95	-6,96
2000	1,28	0,26	-0,76	-1,78	-2,78	-3,82	-4,85	-5,87	-6,88	-7,9	-8,93
3000	-0,58	-1,61	-2,64	-3,67	-4,67	-5,73	-6,77	-7,8	-8,82	-9,86	-10,89
5000	-4,3	-4,35	-6,4	-7,45	-8,45	-9,55	-10,62	-11,67	-12,71	-13,76	-14,8
8000	-9,88	-10,96									
10000	-13,6	-14,7									

Tabulka 4. Hodnoty teplot  $T_2$  v závislosti na  $T_1$  a  $\Delta p$

Jako tlak  $p_2$ , tedy tlak po expanzi, uvažuji  $p_2 = 101,325\text{ kPa}$  a pokud mám  $\Delta p = 5000\text{ kPa}$ , tak vyplývá, že tlak  $p_1 = 5101,325\text{ kPa}$ .

Na další straně uvádím graf, který zachycuje závislost teploty  $T_2$  na tlaku a vstupní teplotě. Neuvádím všechny teploty od  $+5$  do  $-5\text{ °C}$ , jelikož křivky vypadají velmi podobně. Graf je tedy pro vstupní teploty  $+5\text{ °C}$ ,  $+2\text{ °C}$ ,  $0\text{ °C}$  a  $-2\text{ °C}$ . Pro lepší orientaci je pod grafem popisek.





Obrázek 25. Závislost výstupní teploty na změně tlaku a vstupní teplotě

Rovnice přímky vstupní teploty +5 °C je:  $y = -0,0019x + 4,9989$

Počítám zde s variantou, že mám vstupní vzduch o teplotě pod bodem mrazu. Z toho však plyne nebezpečí, že by mohl vzduch v trubkách namrznat, jelikož obsahuje vlhkost. Komplikaci bych řešil buď izolací trubek, nebo zařízením na odvlhčení vzduchu. Odvlhčovač znamená další konstrukční a energetický prvek v soustavě a tím i celkovou větší náročnost zařízení. Při teplotách nad nulou by tento problém nenastal.

Tímto jsem vyřešil vzduchovou část a nyní popíšu druhou část, to znamená vodní. Je to ta nejdůležitější složka, bez které by umělý sníh těžko vznikal. Vodu dopravuji pomocí čerpadla a potrubí k trysce. Tryska rozpráší kapalinu na spoustu malých kapiček. Velikost kapiček může být v řádu stovek, desítek i jednotek  $\mu\text{m}$ . Záleží na konstrukčním provedení trysky a na tlaku. Podle experimentu v kapitole 3.1.3..1 a zveřejněného grafu je vidět, že velikost kapiček se exponenciálně snižuje s rostoucím tlakem až do hodnot tlaku okolo 1000 kPa.

Dalo by se říci, že tyto malé kapičky vody jsou nukleáty, tedy zárodky sněhových krystalů. Kapičky o této velikosti mnohem lépe mění skupenství z kapaliny na pevnou látku. Platí, že čím menší, tím rychlejší krystalizace. Kapičky vody vylétávající z trysky jsou ofukovány proudem vzduchu, který je zchlazen na teplotu -4 °C. Teplota vody bude samozřejmě vyšší než 0 °C, aby nezamrzala. Ideální by byla okolo +3 až +4 °C. Při +4 °C a tlaku  $p = 100$  kPa je hustota vody  $\rho = 999,97$   $\text{kg/m}^3$  a kinematická viskozita  $\nu = 1,5671 \cdot 10^{-6}$   $\text{m}^2/\text{s}$ . [23]

### 3.3. Shrnutí

Rešerše obsahuje dva návrhy zařízení na tvorbu umělého sněhu. Jsou si blízké svým principem, ale liší se od sebe stavbou a parametry. Dále popisují experimentální generátor sněhu ve větrném tunelu v Telči. Původní nastavení umožňovalo generování pouze vodních kapek, ale zajímavým způsobem se podařilo vytvořit skutečný zasněžovač.

Při aplikaci Joule-Thomsonova jevu jsem při výpočtech dospěl ke zjištění, že při vhodném nastavení jednotlivých veličin je možné tento jev využít. Nejsem si jistý, jestli by bylo reálné na tomto principu produkovat umělý sníh ve velkém množství, ale jako experimentální zařízení by mohlo reálně fungovat. Určitě je to zajímavý podnět k dalšímu zkoumání.

## 4. Závěr

---

V této rešerši jsou shrnuty informace, které se týkají umělého sněhu. V teoretické části nejprve popisují, jaké byly ve 20. století počátky odborného zkoumání přírodního sněhu. Mnoho studií ho rozřazují podle tvaru a podle velikosti sněhových krystalů. Studie, která je považována za aktuální a celosvětově uznávanou pochází z roku 2003. Do klasifikace je zahrnut i umělý sníh.

Umělý sníh se od přírodního liší. Liší se vlastnostmi i tvarem. Krystaly umělého sněhu bývají více nasycené, obsahují více vlhkosti, mají tvar do O a nazývají se hydrometeority. A pokud bych se zaměřil na umělý sníh vyráběný na sjezdovkách, tak je i trvanlivější.

S výrobou umělého sněhu jsou spojeny laboratorní experimenty. V této práci popisují jednu variantu. V tzv. oblačné komoře, která na výšku měří 6,5 m, se díky chladnému vzduchu a malým kapičkám dařilo vytvářet krystalky umělého sněhu. Ke zlepšení vlastností je vyráběna směs vody a bakterie *pseudomonas syringae*. Tato bakterie se získává z rostlin a dokonce se v nízké koncentraci vyskytuje i ve vodě. Dalo by se říct, že její používání při výrobě sněhu není závadné, ale opak je pravdou. Ve směsi je totiž *pseudomonas syringae* obsažena v mnohem větším množství. Částečně působí jako hnojivo. Sněhová pokrývka často na svazích leží do konce března, někdy i déle. Jeden neblahý aspekt je tedy už ten, že stráně a vegetace na nich jsou pěchovány a udusány. Dalším problémem je samotná přítomnost bakterie. Kvůli ní je poté urychlen růst vegetace. Není to zkrátka přirozené a při dlouhodobém užívání potenciálně nebezpečné z hlediska životního prostředí. Aditiva se používala hlavně dříve a v současnosti se při zasněžování tolik nepoužívají.

Zmiňuji také způsoby jak se umělý sníh v současnosti vyrábí. Kromě klasických sněhových děl, která jsou běžně k vidění podél sjezdovek, totiž existuje zařízení, které je teoreticky schopné produkovat sníh až do teplot  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vyrábí ho italská firma a používá ho dokonce jedno zimní středisko v České republice.

Dále zde popisují Joule-Thomsonův jev, který poté využiji při výpočtech. V rešerši navrhuji dva typy generátorů sněhu, které jsou hlavně pro domácí použití. Vztahy, které využívám pro výpočet J-T jevu jsou trochu zjednodušené a konečné výsledky jsou přibližné. Mým záměrem však bylo, ukázat, za jakých podmínek by bylo možné aplikovat J-T jev na výrobu umělého sněhu. V praxi se totiž na tvorbu umělého sněhu příliš nepoužívá. Cílem bylo, dostat se z teploty okolí, která je například  $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , na teplotu  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při této teplotě již kapičky vody, nebo-li nukleáty, krystalizují a vzniká umělý sníh. Při vhodném nastavení tlaku, resp. přetlaku v potrubí je teoreticky možné tímto způsobem vyrábět umělý sníh.

V návaznosti na tuto práci by se dalo pokračovat v konkrétních výpočtech, návrhu a konstrukci zařízení na výrobu umělého sněhu.

## 5. Použitá literatura

---

- [1] KIKUCHI, Katsuhiko, KAMEDA, Takao, HIGUCHI, Keiji, YAMASHITA, Akira. A global classification of snow crystals, ice crystals, and solid precipitation based on observations from middle latitudes to polar regions. [vid. 2018-04-28].  
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809513001841>, *Volumes 132–133*, October–November 2013, Pages 460-472
- [2] LEE, Y.-I., SAWA, D., ITO, F., MADJID S.N., KAGAWA K. Production of artificial snow crystals using charged thin hairs in a thermos containing a mixture of salt and ice. In: Science direct [online]. Chonbuk National University, the University of Fukui, University of Sylah Kuala, 2004.[vid.2018-04-28]. ISSN: 1567-1739, E-ISSN: 1567-1739, Pages 397-400.  
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1567173904001397>
- [3] TAKAHASHI, Chuji, MORI, Masaru. Growth of snow crystals from frozen water droplets. In: Science direct [online]. Saitama University, 2005.[vid.2018-04-28]. Pages 385-390. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809506000494>
- [4] LAMBERT, Bruce. Vincent J. Schaefer, 87, is dead; Chemist who first seeded clouds. In: The New York Times, 1993. [vid.2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.nytimes.com/1993/07/28/obituaries/vincent-j-schaefer-87-is-dead-chemist-who-first-seeded-clouds.html>
- [6] LAGRIFFOUL, A., BOUDENNE, J.L., ABSI, R., BALLEST, BERJEAUD, J.M., CHEVALIER, S., CREEPY, E.E., GILLI, E., GADONNA, J.P., GADONNA-WIDHEM, P., MORRIS, C.E., ZINI, S. Bacterial-based additives for the production of artificial snow: What are the risks to human health?. In: Science direct [online]. Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail, Université de Provence, Institut Polytechnique Saint-Louis, Laboratoire d'immunologie et immunopathologie, Université de Poitiers, Université de Rouen, Université Bordeaux, Université Paris 8, UMR Espace 6012, Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, INRA, 2009. [vid.2018-04-28].
- [7] SNOWatHOME. SG3 E-Type (External Mix) Snowmaker Plans [online]. [cit. 20.4.2019]  
Dostupné z: [https://www.snowathome.com/free\\_plans/SG3%20E%20Free%20Plans.pdf](https://www.snowathome.com/free_plans/SG3%20E%20Free%20Plans.pdf)
- [8] UPOL. Joule-Thomsonův jev. [online]. [cit. 26.4.2019]. Dostupné z: [https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/Praktikum\\_Joule-thoms\\_experiment.pdf](https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/Praktikum_Joule-thoms_experiment.pdf)
- [9] Malijevská, I., Malijevský, A., Novák, J. Záhady, klíče, zajímavosti – Očima fyzikální chemie. [online]. [cit. 26.4.2019]. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-80-7080-535-8/pdf/041.pdf](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-535-8/pdf/041.pdf)
- [10] VŠCHT. Stanovení Jouleova-Thomsonova koeficientu reálného plynu [online]. [cit.20.4.2019 ] Dostupné z: <https://ufch.vscht.cz/files/uzel/0014043/0020~~88ovzUmND8nIzy3Oz4svzcnPqIw3jE-MNwIA.pdf?redirected>
- [11] E-konstruktor [online]. [cit. 20.4.2019]. Dostupné z: <https://e-konstruktor.cz/prakticka-informace/trubkovy-zavit-npt>

[12] Kuznetsov, Sergii. Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2017. Název projektu: Výzkum parametrického enerátoru sněhu. Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v.v.i. Praha: Technoloická agentura České republiky, 2017.

[13] Westenberg Engineering [online] [cit. 1.5.2019]. Dostupné z: <http://www.westenberg-engineering.de/en/wind-tunnels/wind-tunnels/goettingen-type-wind-tunnels/>

[14] NOŽIČKA, Jiří. Základy termomechaniky. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008.

[15] STŘEDA, Ivo, SAZIMA, Miroslav, DOUBRAVA, Jiří. Termomechanika. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1992.

[16] Chlazení trochu jinak – výroba technického sněhu [online] [cit. 18.5.2019]. Dostupné z: <http://www.audry.cz/editor/filestore/File/chlazení.pdf>

[17] Technický vs. přírodní sníh [online] [cit. 18.5.2019]. Dostupné z: <https://www.meteopress.cz/vysvetleni/technicky-vs-prirodni-snih/>

[18] Na Monínci už zasnežují. Nová technologie vyrobí sníh až do 35 stupňů [online] [cit. 18.5.2019]. Dostupné z: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/na-moninci-uz-zasnezuji-nova-technologie-vyrobi-snih-az-do-35-stupnu-3131>

[19] Továrna na sníh Snowfactory – technický sníh i v půli léta? [online] [cit. 18.5.2019]. Dostupné z: <https://snow.cz/clanek/4254-tovarna-na-snih-snowfactory-technicky-snih-i-v-puli-leta>

[20] Konstanty van der Waalovy rovnice [online] [cit. 18.5.2019]. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/fch/prikladnik/prikladnik/tab/waals.html>

[21] POLING, Bruce, E., PRAUSNITZ, John, M., O'CONNELL, John, P. The properties of gases and liquids. 5. vydání. USA: Mc Graw Hill, International Edition 2007. 8142, 5. edice. 978-0-07-118971-2

[22] Fyzikální vlastnosti vybraných plynů a par [online] [cit. 18.5.2019]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/8-fyzikalni-vlastnosti-vybranych-plynu-a-par>

[23] Hustota  $\rho$ , kinematičká viskozita vody  $\nu$  a povrchové napětí  $\sigma$  v závislosti na teplotě při tlaku  $10^5$  Pa [online] [cit. 18.5.2019]. Dostupné z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HYAR/ke\\_stazeni/cviceni/labore/tabulky.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HYAR/ke_stazeni/cviceni/labore/tabulky.pdf)

+ Příloha Excel

Odkaz:

<https://owncloud.cesnet.cz/index.php/s/HL8OhuRVU73wVbt/download>

Heslo: joulethomson