



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

TECHNOLOGIE PRO ZKAPALŇOVÁNÍ ZEMNÍHO PLYNU A JEHO NÁSLEDNOU DISTRIBUCI A VYUŽITÍ

TECHNOLOGY FOR LIQUEFACTION NATURAL GAS AND ITS USE AND DISTRIBUTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Karel Konopiský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Karel Konopiský
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

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

Technologie pro zkapalňování zemního plynu a jeho následnou distribuci a využití

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zkapalněný zemní plyn se stává důležitou energetickou surovinou a zdá se, že v budoucnu může mít velký vliv i na energetickou politiku.

Cíle bakalářské práce:

- (1) Rešerše vývoje a stavu technologií pro zkapalňování plynů.
- (2) Způsoby využití zkapalněných plynů.
- (3) Popis způsobů zkapalnění zemního plynu.
- (4) Způsoby distribuce zkapalněného plynu (hospodářství se zkapalněným plynem).

Seznam doporučené literatury:

KAPICA, Pjotr Leonidovič. Experiment, teorie, praxe, 1982. 1. vyd. Praha : Mladá fronta. Edice Kolumbus.

ŠKORPÍK, Jiří. Škrzení plynů a par, Transformační technologie, 2006. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/skrzeni-plynu-a-par.html>.

ŠKORPÍK, Jiří. Transformace energie v lopatkových strojích, Transformační technologie, 2009. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/transformace-energie-v-lopatkovych-strojich.html>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

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

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá technologiemi zkapalňování plynů a způsoby jejich následného skladování a využití. Nejprve shrnuji historii vývoje technologie zkapalňování plynů a dosahování nízkých teplot. V následujících částech se práce věnuje způsobům využití a distribuce zkapalněných plynů. Speciální pozornost je v práci věnována kapalnému zemnímu plynu, který má ze zkapalňovaných plynů největší využití v praxi. Samostatná část je pak vyhrazena způsobu zkapalňování zemního plynu.

Klíčová slova

Zkapalňování plynů, kryogenní technika, velmi nízké teploty, kapalný zemní plyn, LNG, kryogenní zkapalňování

Abstract

This bachelor thesis is concerned with technologies of liquefaction of gases, and methods of their subsequent storage and utilisation. Firstly, I summarise a history of the technology of liquefying gases and reaching low temperatures. In the following parts, the thesis is focused on means of utilisation and distribution of liquefied gases. Special attention is paid to liquid natural gas, which is the most used liquefied gas in practice. A separate part of the thesis is then designated to a method of liquefaction of natural gas.

Keywords

Liquefaction of gases, cryogenic technique, very low temperatures, liquid natural gas, LNG, cryogenic liquefaction

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KONOPISKÝ, K. *Technologie pro zkapalňování zemního plynu a jeho následnou distribuci a využití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Tímto prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Jiřího Škorpíka, Ph.D. s využitím informací ze zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne 25. 5. 2018

.....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Škorpíkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky a rady, vstřícný přístup a pohotovou komunikaci, kterou mi poskytl při vypracování této práce.

OBSAH

ÚVOD.....	15
1 Vývoj technologií pro výrobu zkapalněných plynů	17
1.1 Vývoj kryogenní techniky.....	17
1.2 Dosazování velmi nízkých teplot.....	19
2 Způsoby využití kapalných plynů.....	21
2.1 Biologie a lékařství	21
2.1.1 Kryobanky	21
2.1.2 Kryochirurgie.....	22
2.1.3 Kryoterapie	22
2.2 Zemědělství.....	22
2.3 Potravinářství	22
2.3.1 Zchlazování a zmrazování	22
2.4 Strojírenství a hutnictví.....	23
2.5 Elektrotechnika	23
2.6 Raketový a kosmický průmysl.....	23
2.7 Energetika	25
2.8 Doprava.....	25
2.8.1 Silniční doprava	25
2.8.2 Lodní doprava.....	28
3 Popis způsobů průmyslového zkapalnění zemního plynu	29
3.1 Kaskádový cyklus	29
3.2 Vícekompresní směs jako pracovní látka v okruhu	30
4 Způsoby distribuce a skladování zkapalněného plynu	32
4.1 Distribuce zkapalněného zemního plynu	32
4.1.1 Lodní doprava.....	33
4.1.2 Železniční a automobilová přeprava.....	34
4.1.3 Vratné a nevráté lahve	34
4.2 Skladování kapalného zemního plynu	36
4.2.1 Kryogenní skladování.....	37
ZÁVĚR.....	39

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	40
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	44
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	45

ÚVOD

Zkapalňováním plynů se zabývá obor zvaný kryogenika. Kromě zkapalňování plynů se tento obor zaměřuje rovněž na dosahování nízkých hodnot blížících se k absolutní teplotní nule. Do oboru kryogeniky spadají především tzv. permanentní plyny, které mají bod varu pod hranicí teploty -180 °C .

S postupujícím zlepšováním technologií pro zkapalňování se postupně podařilo dosahovat stále nižších teplotních hodnot, a tím pádem i získávat potřebné teploty bodu varu všech známých plynů. Nejdéle pak zkapalnění odolávalo hélium. S vývojem technologie docházelo i k pozvolnému využívání kapalných plynů v průmyslu a běžném životě.

Nejvíce se v současné době uplatňuje zkapalněný zemní plyn. Zemní plyn je po ropě hned druhou nejdůležitější energetickou surovinou, a tak si i jeho kapalná forma našla široké využití zejména při přepravě a skladování zemního plynu a dále jako pohonná látka v dopravě. Právě schopnost splnit požadavky na vysokou energetickou hustotu přepravované energie a vysokou míru ekologičnosti oproti současným palivům zajišťuje do budoucna kapalnému zemnímu plynu rostoucí využití.

Cílem práce je formou rešerše, za pomoci dostupných literárních zdrojů, zmapovat vývoj technologií pro zkapalňování plynů a jejich současné uplatnění. Dalším cílem je pak popsat průmyslově užívané technologie pro zkapalňování zemního plynu a jeho následnou distribuci a způsoby možného využití.

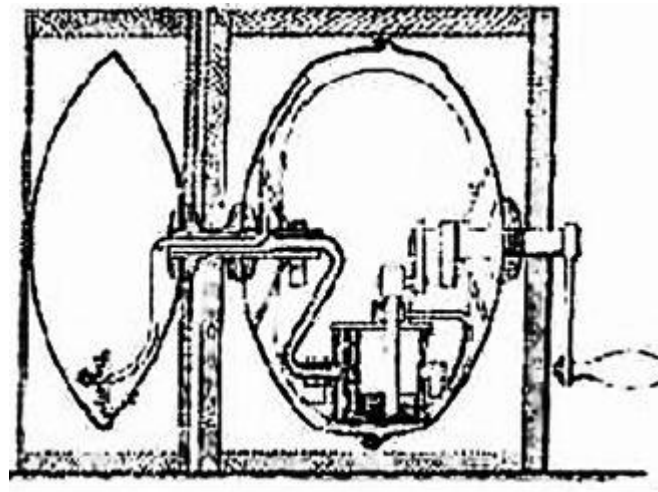
1 Vývoj technologií pro výrobu zkapalněných plynů

Lidstvo si již od pravěku uvědomovalo účinky nízkých teplot¹, které se projevovaly zejména tuhnutím vody či křehnutím materiálů. Dále byly nízké teploty využívány například ke konzervaci potravin a pro anestetické účinky. Nicméně tehdy člověk nebyl schopen dosahovat nízkých teplot vlastní cílenou činností.

Tento stav se začal měnit v průběhu 18. století, kdy se objevily první náznaky technologií pro zkapalňování plynů. Vědci se od této doby zajímali zejména o možnost zkapalnění všech známých plynů, o dosažení co nejnižší možné teploty a její dlouhodobé udržení.

1.1 Vývoj kryogenní techniky

Vývoj technologie pro zkapalňování plynů souvisí s vývojem chladicí techniky. Za první doložený mechanismus sloužící k umělému ochlazení vody až pod její bod mrazu, a tím pádem k výrobě ledu, je uváděn stroj irského lékaře a chemika Williama Cullena sestavený kolem roku 1750. Stroj se skládal z ruční pumpy na vytvoření částečného vakua a diethyl etheru, který při varu za sníženého tlaku odebíral teplo od okolí. Při tomto procesu došlo k vytvoření malého množství ledu, vynález však v této době nenašel komerčního využití.[1]



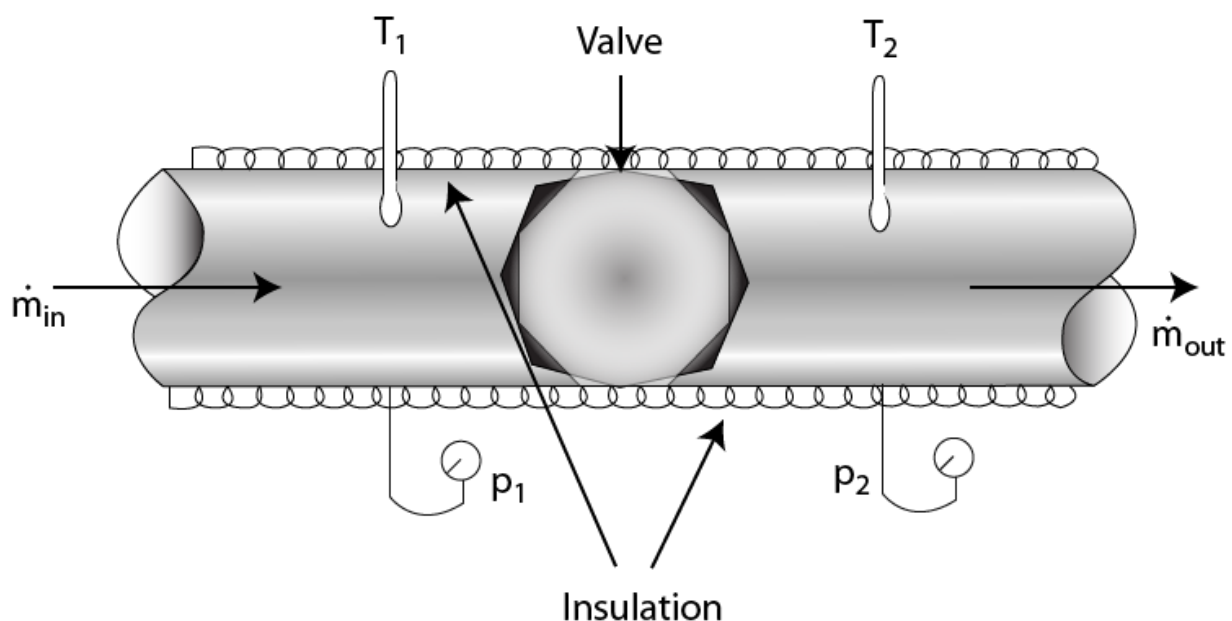
Obr. 1.1 Návrh prvního stroje na výrobu ledu [2]

Dalším významným vědcem, který se významně zasloužil o rozvoj kryogenní techniky, byl Michael Faraday. Ten se úspěšně pokusil zkapalnit za pomoci tlaku plyny jako chlor (Cl), oxid uhličitý (CO₂), sulfan (H₂S) nebo bromovodík (HBr). Neuspěl pak při pokusu

¹ Obdobně si lidé všimli účinků vysokých teplot, zejména ve formě ohně.

o zkapalnění tzv. *permanentních plynů*, jako jsou oxid uhelnatý (CO), metan (CH₄), kyslík (O₂), dusík (N₂) a vodík (H₂). Pokusy se nezdařily, protože tehdy ještě nebylo známo, že je nutné ochladit plyny pod jejich kritickou teplotu. Tento jev objasnil až roku 1869 irský vědec Thomas Andrews.

Objev Joule-Thompsonova jevu v roce 1853 výrazně přispěl k pozdějšímu zkapalnění většiny tehdy známých plynů. Tento jev nastává při protlačování reálného plynu v tepelně izolované trubici přes pórovitou zátku (valve). Větší tlak plynu na jedné straně způsobuje protlačení plynu přes zátku, kde dochází ke škrcení plynu. Experimentálně pak bylo zjištěno, že všechny reálné plyny se při dostatečně stavech ochlazují či zahřívají. Mezní tepelná hodnota mezi těmito stavy se pak nazývá inverzní teplota.[3]



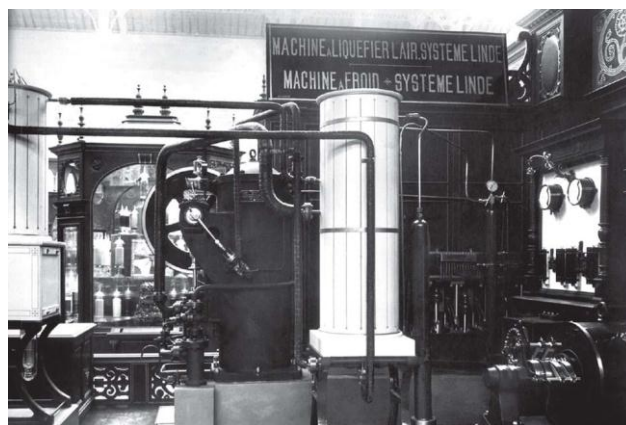
Obr. 1.2 Schéma Joule-Thompsonova jevu[4]

Dalším významným pokrokem bylo roku 1877 zkapalnění kyslíku ve formě mlhy. Tohoto pokroku se nezávisle na sobě povedlo dosáhnout švýcarskému fyziku Raoulu-Pierre Pictetovi a francouzskému fyziku Louisi Paulu Cailletetovi. Zkapalnění docílili stlačením a následnou adiabatickou expanzí látky.

V roce 1883 se podařilo vědcům Zigmuntu Wróblewskému a Karolu Olszewskému na Krakovské univerzitě zkapalnit dusík a kyslík. Expanzí kapalného kyslíku zkapalňují i vodík (do formy drobných kapiček).

Za pomoci Joule-Thomsonova jevu se podařilo roku 1898 skotskému chemikovi Jamesu Dewarovi získat vodík v kapalném stavu.

Velkým průlomem bylo v roce 1885 sestavení vratného stroje německým vynálezcem Carlem von Lindem. Jednalo se o zkapalňovač využívající pro výrobu kapalného vzduchu opakovaně Joule-Thomsonovy expanze. Tento stroj byl základem pro výrobu velkokapacitních zkapalňovačů, jež jsou využívány do současnosti.[5] Carl von Linde založil společnost na výrobu chladírenských zařízení a zkapalňovačů, která doposud patří k největším v oboru².



Obr. 1.3 Zkapalňovač na výrobu kapalného vzduchu[6]

Po dlouhou dobu se vědci neúspěšně snažili zkapalnit hélium, jelikož má z kapalných plynů nejnižší bod varu (4,215 K). To se nakonec podařilo v roce 1908 holandskému fyziku Heike Kamerlingh Onnesovi. V roce 1913 pak za tento objev získal Nobelovu cenu za fyziku.

1.2 Dosazování velmi nízkých teplot

Po dosažení zkapalnění hélia, jehož hodnota varu činí 4,215 K, bylo zřejmé, že ještě nižších teplotních hodnot blížících se k absolutní nule (0 K) bude potřeba dosáhnout jinými technikami.

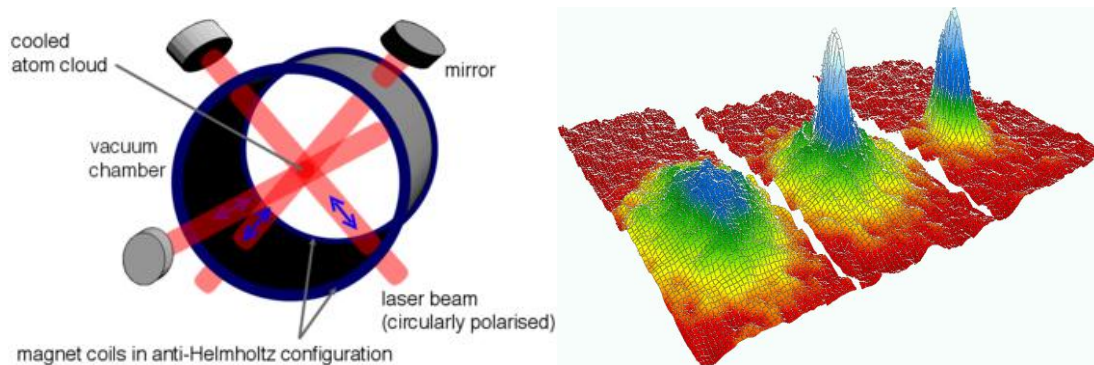
Pro dosažení co nejnižší teploty využívala většina tehdy vznikajících laboratoří kapalného hélia. Brzy bylo zjištěno, že při odčerpání par hélia ^4He se docílí nejnižší teploty 0,7 K. Ještě nižší teploty 0,3 K pak bylo dosaženo při použití izotopu hélia ^3He .

V roce 1926 představili vědci Peter Debye a William Giaquie nezávisle na sobě metodu magnetického chlazení, tzv. adiabatickou demagnetizaci paramagnetických solí. Tato metoda přinesla potenciál dosahovat hodnot až v řádech mK. Samotnému Williamu Giaquiemu se pak podařilo touto metodou docílit v roce 1933 hodnoty 0,5 K. Do roku 1975 byla touto metodou dosažena hranice 2 mK a o tři roky později v Ústavu jaderné fyziky ČSAV v Řeži u Prahy získali teplotu 0,5 mK.

² Společnost The Linde Group

Důležitý pokrok znamenal roku 1934 návrh metody tzv. jaderného chlazení, které využívá jaderných spinů namísto elektronových, nicméně tato metoda byla náročná na provedení. Teoreticky se předpokládalo dosažení hodnoty až v řádech 10^{-7} K. K prvním praktickým pokusům využívajících tuto metodu chlazení došlo až roku 1956 v Oxfordu, kde se podařilo soustavu jader mědi (Cu) ochladit na teplotu 1 mK. Roku 1975 bylo při použití dvoustupňové demagnetizační aparatury docíleno 50 nK.

Dalším důležitým milníkem bylo získání Bose-Einsteinova kondenzátu, což je látka tvořená bosony při teplotách blížících se 0 K. K tomuto stavu se dospělo v roce 1995 za pomoci magneticko-optické pasti a silného chlazení. Za sestavení tohoto zařízení získali vědci Eric Cornell, Carl Wieman a Wolfgang Ketterle v roce 2001 Nobelovu cenu za fyziku. Nejnižší dosažená hodnota touto metodou pak činí 450 pK. [7],[8],[9]



Obr. 1.4 Schéma magneticko-optické pasti a grafické znázornění Bose-Einsteinova kondenzátu[10]

2 Způsoby využití kapalných plynů

Zkapalněné plyny se nepoužívají pouze v laboratořích při fyzikálních výzkumech, ale uplatňují se v řadě dalších vědních odvětví a našly si cestu i do průmyslu.

2.1 Biologie a lékařství

V těchto odvětvích se jednoznačně nejvíce ze zkapalněných plynů využívá dusík. Dalšími využívanými kapalnými plyny jsou argon a helium. Díky nízké teplotě dusíku v kapalném stavu ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) se uplatňuje v kryobankách, kryoterapii a kryochirurgii.

Pro skladování vzorků, přepravu a skladování kapalného dusíku se používají tzv. Dewarovy nádoby nebo transportní kryogenní nádoby.



Obr. 2.1 Dewarova láhev a její schéma [11]

2.1.1 Kryobanky

Kapalný dusík se v kryobankách používá pro dlouhodobé uchování biologického materiálu nebo jeho přepravu. V kapalném dusíku nebo jeho párách jsou uskladňovány například viry, bakterie, kostní štěpy, spermie, pupečnicková krev atd.

2.1.2 Kryochirurgie

Nízkých teplot dusíku se využívá především v kožním lékařství a v kryochirurgii k ničení buněčných struktur. Nejčastěji se jedná o odstranění nežádoucích kožních útvarů (např. bradavic a kožních nádorů). Ty jsou odstraněny za pomoci prudkého zmrazení útvaru po přesně danou dobu a jeho následného ohřátí. Výhodou této metody je malá míra invazivity, snížení následné bolesti a nízké náklady.



Obr. 2.2 Bombička a nástavec na použití tekutého dusíku v kožní chirurgii[12]

Při léčbě popálenin a krevních zduřenin se pak uplatňuje povrchová aplikace rozprášeného kapalného dusíku.

2.1.3 Kryoterapie

V této oblasti lékařství se využívá léčebných účinků nízkých teplot. Ke kryoterapii dochází ve speciálně upravených uzavřených komorách, kde pacient stráví 2-3 minuty v teplotách pohybujících se v rozmezí -110°C až -160°C . [13]

2.2 Zemědělství

Také v zemědělství převládá využívání kapalného dusíku a to za podobnými účely jako v lékařství, konkrétně k uchování biologického materiálu. Příkladem mohou být inseminační zásobníky sloužící k uchování býčího spermatu či semen vzácných rostlin. [14]

2.3 Potravinářství

V potravinářském průmyslu si kapalně plyny našly uplatnění především při konzervaci a uchování potravin. [15]

2.3.1 Zchlazování a zmrazování

Proces kryogenního chlazení (či šokové zmrazování) nabízí oproti tradičním mechanickým chladicím a zmrazovacím technologiím důležité výhody v podobě zvýšené produktivity procesu a zvýšení kvality výsledného zamrazeného produktu, jelikož se v maximální míře zachovávají jeho původní vlastnosti. Tento proces využívající tekutého dusíku či kapalného oxidu uhličitého lze využít u řady potravin, jako je pečivo, ovoce a zelenina či mořské plody. [16]

2.4 Strojírenství a hutnictví

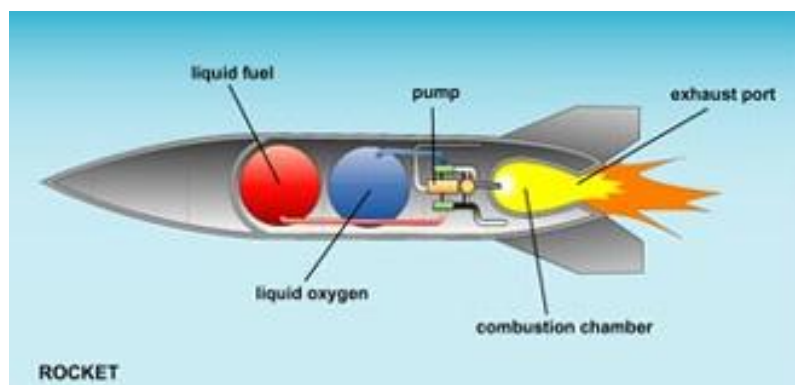
V těchto oborech se uplatňují kryogenicky vyráběné plyny jako kyslík (O_2), vodík (H_2), argon (Ar) či neon (Ne) zejména při svařování, řezání, temperování či žhání oceli. Dále se těchto plynů využívá při nalisování přesahujících součástí či drcení gumy a plastu.

2.5 Elektrotechnika

V tomto oboru hraje využívání kapalných plynů významnou, v některých případech nezastupitelnou roli. Nejčastěji se zde tyto plyny využívají na chlazení vodičů pro snížení jejich odporu, snížení šumu elektronických zařízení a pro dosahování supravodivosti u kovů jako olovo, cín, indium a rtuť jejich chlazením, čímž se sníží odpor elektrického proudu jimi procházející téměř na nulu. Technologie supravodivosti má potenciál pro konstrukci dlouhých elektrických vedení při zamezení tepelných (tzv. Jouleových) ztrát, možnosti ukládání energie s účinností přesahující 95 % a využití v silných magnetech. Právě posledně jmenované supravodivé magnety jsou již využívány v dopravních systémech Maglev. Vlaky využívající tuto technologii jsou magneticky nadnášeny, čímž se významně snižuje jejich odpor a tím se tak výrazně zvyšuje jejich rychlost.[17]

2.6 Raketový a kosmický průmysl

Tyto dva obory jsou úzce spjaty a našla zde využití celá řada zkapalněných plynů, bez nichž by se oba tyto obory již neobešly. Nejdůležitější je zde využívání paliva ve formě kapalného vodíku. Jako okysličovadlo se pak využívá kapalného kyslíku či flóru. Kapalná paliva se obecně využívají pro jejich vyšší účinnost ve srovnání s pevnými palivy.



Obr. 2.3 Schéma použití kapalného plynu jako paliva a okysličovadla v raketě[18]

Nejnovější rakety společnosti SpaceX však již využívají kombinaci paliva ve formě vysoce rafinovaného petroleje RP-1 a tekutého kyslíku jako okysličovadla. Toto palivo se začalo používat pro jeho nižší náklady, stálost při pokojové teplotě a nižší toxicitu.[19]

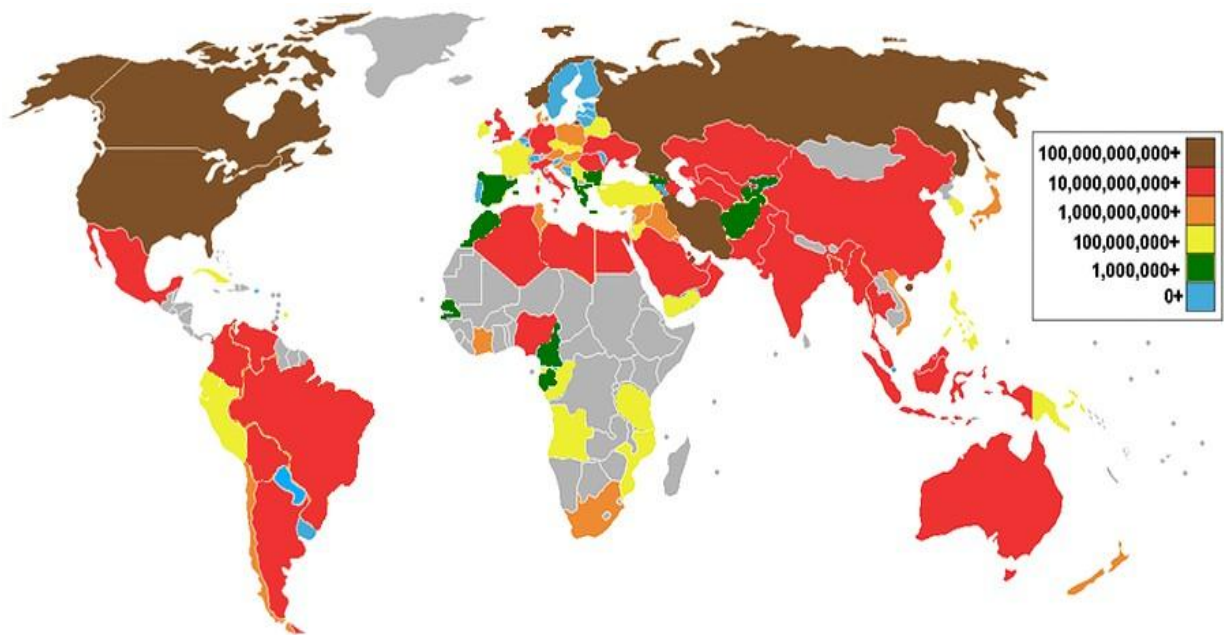
Dalším používaným kapalným plynem je dusík, který v těchto oborech slouží k předchlazování nádrží, aby se zvýšila účinnost paliva či pro simulování vlivu kosmického prostředí na přístroje.

Pro přesnou navigaci se využívá supravodivých quantum gyroskopů, které měří jemné změny gravitačního pole. Ty jsou tvořeny rotujícími prstenci z niobu a olova v kapalném héliu.[20]

2.7 Energetika

Všechny výše zmíněné plyny patří mezi tzv. permanentní plyny s hraniční teplotou varu pod -180°C . Nejvýznamnější využívání kapalného plynu v současnosti zaznamenáváme u kapalného zemního plynu (tvořeného především metanem), který do této skupiny nepatří, jelikož jeho teplota varu se pohybuje kolem -162°C .

Zemní plyn je hned po ropě druhou nejvíce využívanou energetickou surovinou. Je užitečný především ve formě vytápění a jako alternativa pro pohon vozidel. Vzhledem k nerovnoměrnému rozmístění ložisek zemního plynu po světě je nutné ho v mnoha případech transportovat na dlouhé vzdálenosti. Právě v těchto případech má technologie zkapalnění významný přínos, protože zkapalněním se objem plynu zmenší přibližně 600krát, a lze tak přepravit více plynu.[21]



Obr. 2.4 Mapa produkce zemního plynu ve světě v (m^3/rok)[22]

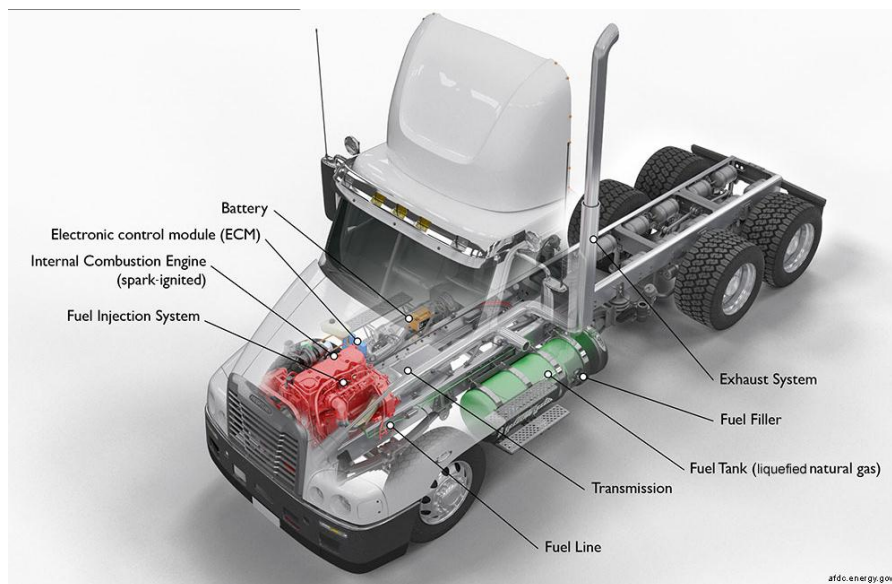
2.8 Doprava

Právě v této oblasti má do budoucna používání zkapalněného zemního plynu velký potenciál. Výhodou kapalného skupenství je to, že se v praxi tankuje objemově méně plynu v kapalně formě, což znamená, že po změně zpět na plynné skupenství je k dispozici podstatně větší množství paliva a tím pádem i dojezd.

2.8.1 Silniční doprava

Používání kapalného plynu v silniční dopravě není oproti ostatním variantám plynů (compressed natural gas - CNG a liquefied petroleum gas - LPG) natolik rozšířené. Nejvíce

automobilů v současné době používá toto palivo v Americe, v Evropě je teprve očekáván růst popularity, což je způsobeno i současným nedostatkem veřejných čerpacích stanic na toto palivo. Na LNG jezdí převážně autobusy, dodávky a menší nákladní auta. Zkapalněný zemní plyn našel využití i u chladičských vozů, kde slouží jako palivo a jako dodavatel chladu.



Obr. 2.5 Znárodnění pohonné jednotky kamionu poháněného LNG[23]

Výhodou užívání LGP jako paliva do automobilů je menší nádrž, než je tomu například u CNG a LPG (nabízí tak zvýšení zavazadlového prostoru). Další výhodou je přibližně trojnásobně vyšší dojezd, jelikož je LNG stlačen přibližně 600krát, CNG pak jen 200krát. Zkapalněný zemní plyn je v praxi využíván jako palivo především pro autobusy a nákladní vozidla, jelikož jsou díky vyšší ekologii částečně osvobozeny od silniční daně.

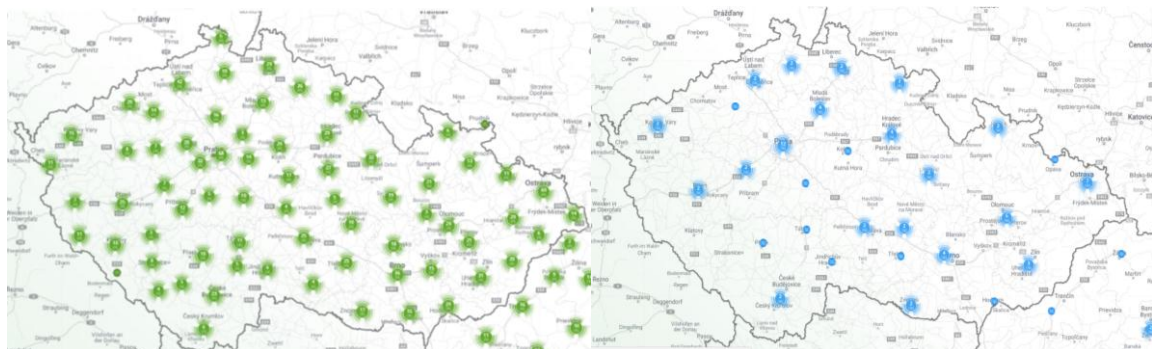


Obr. 2.6 Nádrž na LPG u kamionu[24]

Nevýhodou je malá dostupnost čerpacích stanic a vyšší ceny nádrže, jelikož je potřeba její dokonalá izolace. Velké dopravní společnosti mají proto obvykle své vlastní mobilní tankovací jednotky na LNG. Dalšími nevýhodami je nutnost uskladňování paliva ve speciálních nádržích o velmi nízké teplotě a nutnost zajistit odpařování paliva z nádrže při dlouhodobé odstavce vozidla.



Obr. 2.7 Rozmístění veřejných čerpacích stanic na LNG v ČR[25]



Obr. 2.8 Rozmístění veřejných čerpacích stanic na LPG a CNG v ČR[25]

2.8.2 Lodní doprava

Díky menšímu objemu se LNG velice dobře využívá v lodní dopravě. Především jako pohon tankerů, přepravujících po moři zkapalněný zemní plyn na dlouhé vzdálenosti. První loď tohoto typu byla uvedena do provozu již v roce 1964. V lednu 2000 byl na západním pobřeží Norska zprovozněn první LNG trajekt pro přepravu osob a automobilů.



Obr. 2.9 Loď poháněná kapalným zemním plynem[26]

3 Popis způsobů průmyslového zkapalnění zemního plynu

Pro průmyslové zkapalnění zemního plynu jsou využívány metody tzv. kaskádového cyklu (Cascade cycle) a cyklu s mixovaným chladivem (Mixed-refrigerent cycle), které se uplatňují ve většině zkapalňovacích zařízení.

V menších aplikacích je pro zkapalňování zemního plynu užíváno technologie single-mixed-refrigerent a dusíkového expanzního cyklu.[27]

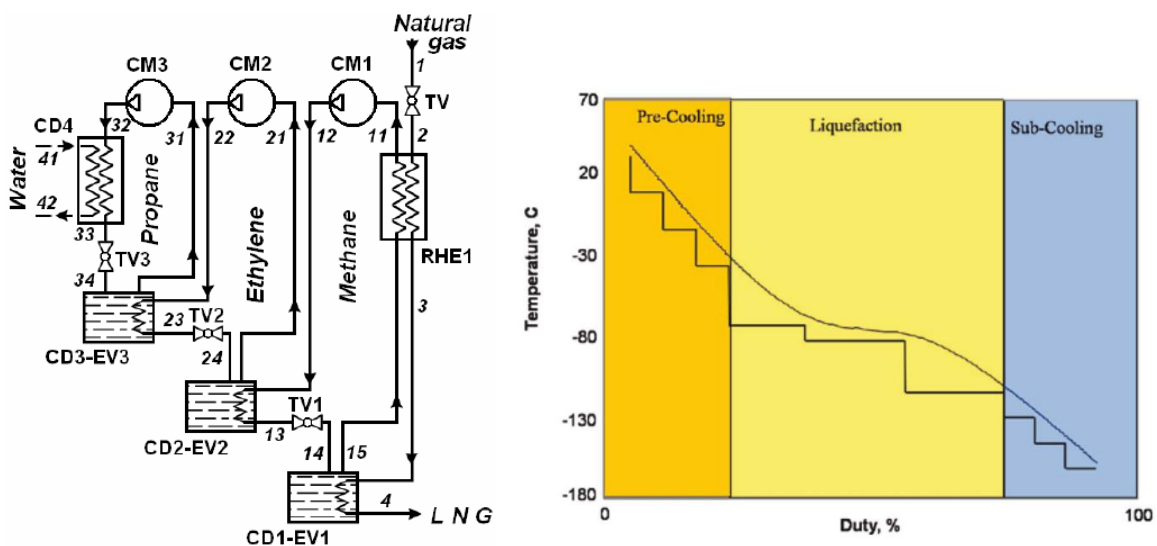
3.1 Kaskádový cyklus

Kaskádové oběhy vznikají sériovým zapojením jednoduchých oběhů do řetězce, které na sebe teplotně a tepelně navazují. Uspořádání je vždy takové, že se teplo odebrané teplotně nižšímu okruhu převádí do oběhu na vyšší teplotní úrovni. Takovým způsobem lze dosáhnout kryogenních teplot až do úrovně kapalného hélia bez expanzního stroje.

Existuje řada možností při výběru vhodných látek, které cirkulují v navazujících obězích. Nejlepší volba chladiva je pak vedena tak, aby trojný bod chladiva v teplotně vyšším okruhu byl nižší než teplota kritického bodu v teplotně nižším okruhu. Pak nedochází ke kondenzaci chladiva a účinnému sdílení tepla.

Kaskádní metoda je principiálně výhodná, protože teplotně navazující okruhy pracují s látkami, jejichž výběr umožňuje režim parního oběhu, který má obecně velmi dobrou účinnost.

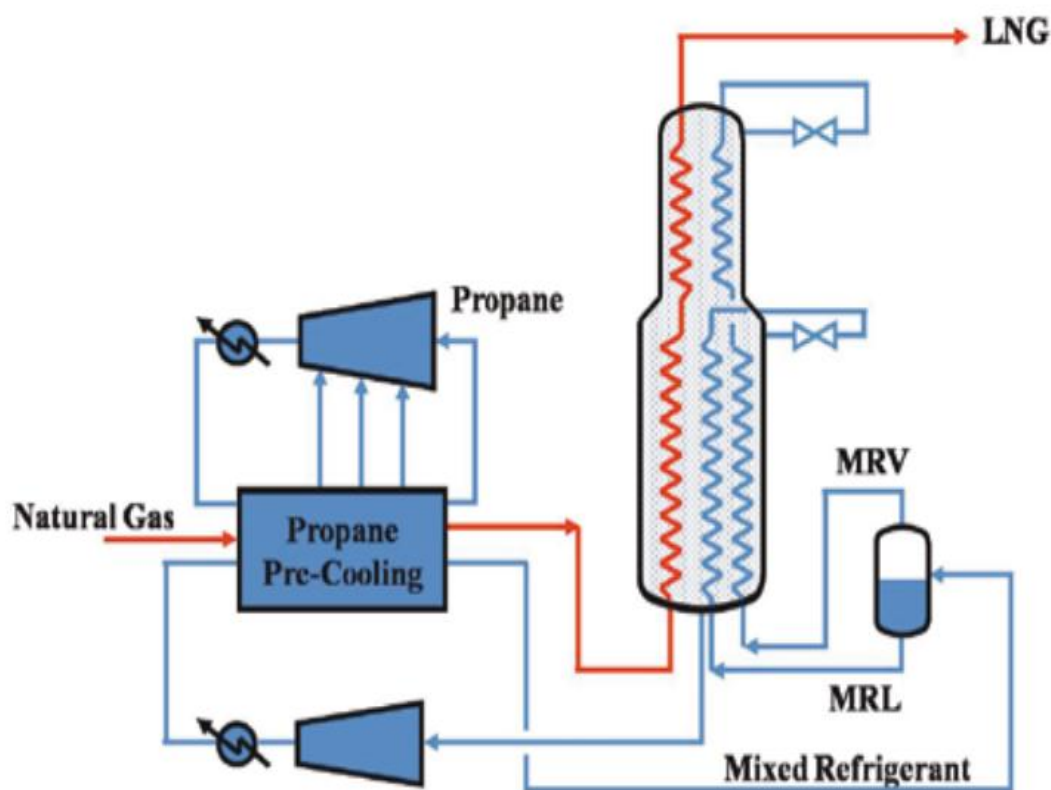
Nevýhodou této metody je nutnost většího množství několikastupňových kompresorů pro různé látky. Nároky na těsné oddělení všech okruhů a potřeba většího počtu výměníků pro chladiva v parní i kapalně fázi, rovněž celé zařízení komplikují.



Obr. 3.1 Schéma klasického kaskádového cyklu a jeho chladící křivky[28]

3.2 Vícekompresní směs jako pracovní látka v okruhu

Rozvoj ve zdokonalování oběhů využívajících expanzi bez konání vnější práce znamenal vytvoření efektivního kaskádního cyklu s vícekomponentní směsí (anglicky používaný výraz *mixed refrigerant*). Tento oběh právě nejvíce vyhovuje pro zkapalňování zemního plynu, kdy pracovní látkou je směs uhlovodíků. Nejedná se však o kaskádně navazující okruhy, ale o stupňovité (kaskádně) oddělené teplotní úrovně ve výměnících, které jsou zapojeny v jednom okruhu.



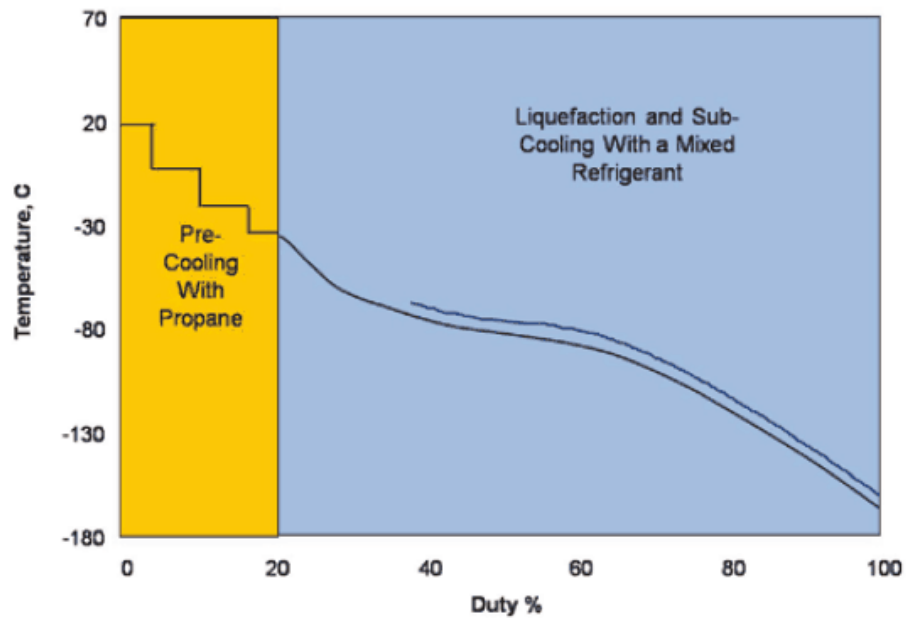
Obr. 3.2 Schéma kaskádového cyklu s vícekomponentní směsí a předchlazením propanem[29]

Ochlazovací směs se skládá obvykle z postupného působení propanu (teplota varu -44,5 °C), etanu (teplota varu -88,3 °C) a metanu (teplota varu -161,5 °C). Dalšími složkami umístěnými v cyklu sestupně dle teploty varu mohou být butan (-0,6 °C), izobutylén (-7,05 °C), propylén (-47 °C) a etylén (-103,8 °C). U konce cyklu se dále může využívat malého množství dusíku, který snižuje parciální tlak metanu a tím i teplotu varu. Následně je tak možné snížit tlak pro zkapalňování zemního plynu a tím i práci kompresoru/dmychadla.

Díky použité směsi s různými body varu je plyn víceúrovňově předchlazen na tak nízkou teplotu, že při závěrečném seškrcení přes škrtící ventil do skladovacího zásobníku vzniká jen minimum syté páry.

Výhodou tohoto cyklu je jeho podstatné zjednodušení oproti klasickému kaskádovému cyklu a to zejména tím, že zde může být použit pouze jeden kompresor.

V případě použití tohoto cyklu je časté spojení s předchlazením například pomocí propanu. [30]



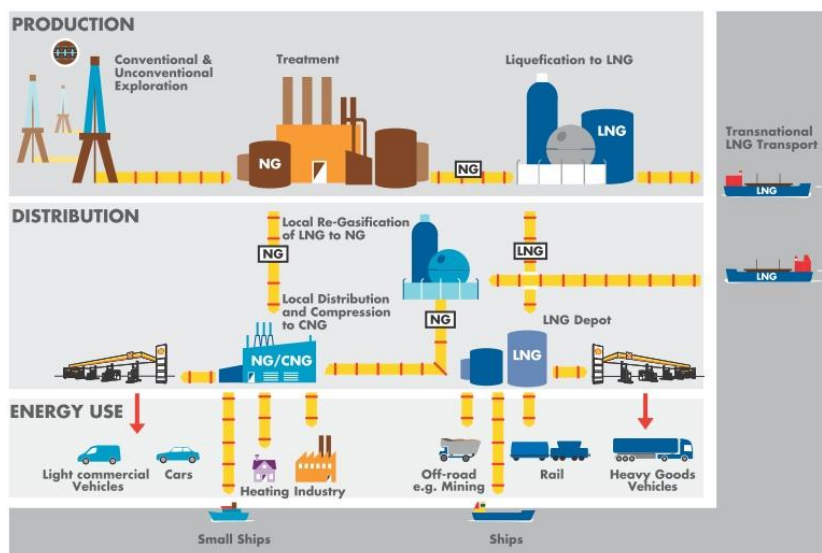
Obr. 3.3 Chladičí křivka při zkapalňování pomocí kaskádového cyklu s předchlazením propanem[27]

4 Způsoby distribuce a skladování zkapalněného plynu

Jelikož zkapalněný zemní plyn je nejvíce využívaný zkapalněný plyn, využívají se pro jeho přepravu všechny způsoby možné i u ostatních kapalných plynů. Proto se v této části zaměřím především na distribuci a skladování právě zkapalněného zemního plynu. Pro ostatní plyny se pak využívá stejných či mírně odlišných způsobů přepravy a skladování.

4.1 Distribuce zkapalněného zemního plynu

Zkapalněný zemní plyn lze do místa určení dopravit několika způsoby, které můžeme dělit především podle vzdálenosti dopravy a objemu přepravovaného plynu. Pro přepravu na dlouhou vzdálenost při velkých objemech slouží loďná doprava. K přepravě na střední vzdálenosti při středních objemech přepravovaného plynu je využívána železniční a silniční přeprava za pomoci cisteren. Pro koncové uživatele je dostupný kapalný zemní plyn v malém objemu obvykle v podobě speciálních vratných a nevratných lahví. Potrubní přeprava je používána pouze na krátké vzdálenosti kvůli potřebě vysoké izolace potrubí a nutnosti chlazení na velmi nízkou teplotu.

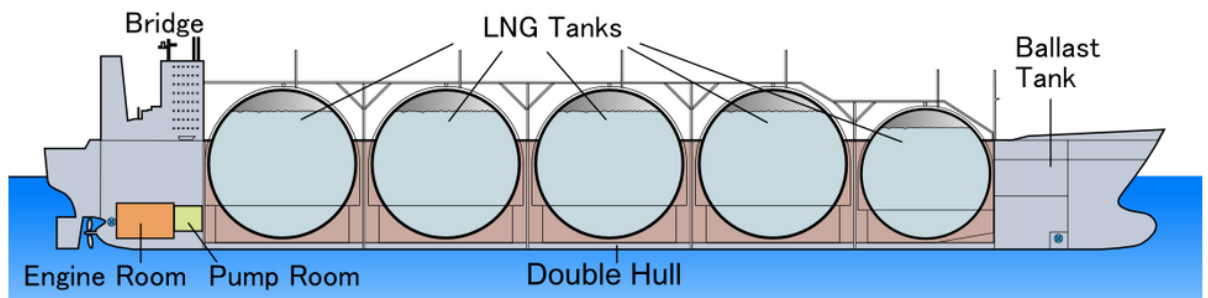


Obr. 4.1 Schéma postupného zpracování a distribuce zemního plynu[31]

4.1.1 Lodní doprava

Lodní přeprava kapalného zemního plynu se využívá především na dlouhé vzdálenosti hlavně tam, kde není možné spojení pomocí plynovodu z ekonomických či geologických důvodů.

Plyn je přepravován ve speciálních tankerech vybavených dokonale izolovanými nádržemi. Lodní dopravou se kapalný plyn doručuje do speciálních terminálů, kde je obvykle odpařováním znovu uveden do plynného stavu a dále distribuován plynovody do sítě nebo je v kapalném stavu ukládán do speciálních úložných zásobníků.



Obr. 4.2 Schéma tankeru na převážení zkapalněného zemního plynu[32]

I přes významné ekonomické náklady na výstavbu tankerů a terminálů je tento způsob přepravy zkapalněného zemního plynu ve světě stále využívanější. Tento fakt je způsobuje především snaha států o diverzifikaci zdrojů dodávek plynu. Dalším důvodem je, že například pro řadu ostrovních či rozvojových států je tento způsob dopravy zemního plynu jediným možným. V mnohých případech je také lodní přeprava zemního plynu jediným možným řešením jak převážet plyn z mořských těžebních plošin.



Obr. 4.3 Terminál pro přijímání kapalného zemního plynu v Itálii[33]

4.1.2 Železniční a automobilová přeprava

Pro mezistátní a vnitrostátní přepravu zkapalněného zemního plynu se volí obvykle jeden z těchto způsobů přepravy či jejich kombinace. Plyn se přepravuje ve speciálních vysokotlakých tancích, které musí být zároveň odolné vůči velmi nízkým teplotám a silně izolovány od okolního prostředí (vakuum), aby nedošlo k odpařování plynu. Silniční dopravy se pak využívá pro doplňování stanic nabízejících LPG jako palivo pro automobily.



Obr. 4.4 Železniční cisterna na přepravu kapalných plynů[34]

4.1.3 Vratné a nevratné lahve

Koncovým uživatelům se kapalným zemním plynem distribuuje ve vysokotlakých lahvích o náplni od 0,4 kg až po 300 kg.

Lahve na zkapalněné plyny s nízkým tlakem par, jako například LPG, LNG atd. nebo chladiva se dodávají v tzv. nízkotlakých lahvích, které bývají často svařované.



Obr. 4.5 Lahve na kapalné plyny[35]

Plyny jako oxid uhličitý nebo oxid dusný se dodávají v lahvích ve zkapalněném stavu. Protože při převozu může být překročena jejich kritická teplota, kdy dojde ke změně kapaliny na plyn, musí být na jejich skladování používány vysokotlaké lahve podobné těm na stlačené plyny.

Speciálním případem lahve jsou nádrže automobilů na LNG. Ty poskytují především velkou zásobu paliva a tím i dlouhý dojezd a lepší ekologické parametry oproti klasickým motorovým palivům.

4.2 Skladování kapalného zemního plynu

Zemní plyn je významnou energetickou surovinou, která se často využívá pro vytápění. Spotřeba plynu při vytápění není v průběhu roku kvůli sezónním výkyvům konstantní. Právě na vyrovnávání sezónních výkyvů slouží zásobníky na skladování plynu. Jejich další funkcí je rovněž uchování zásoby plynu pro případ nečekaného přerušení dodávek plynného zemního plynu plynovody.



Obr. 4.6 Porovnání spotřeby plynu za roky 2013 a 2014[36]

Česká republika má v současnosti celkem devět zásobníků o celkové kapacitě přibližně tři a půl miliardy metrů krychlových. Tyto zásobníky využívají metod ukládání plynu do porézních hornin a ukládání ve skalní kaverně. Za rok 2017 činila spotřeba zemního plynu České republiky 8,53 miliard metrů krychlových, plyn pouze ze zásobníků by tak pokryl zhruba 40 % této spotřeby.[37]



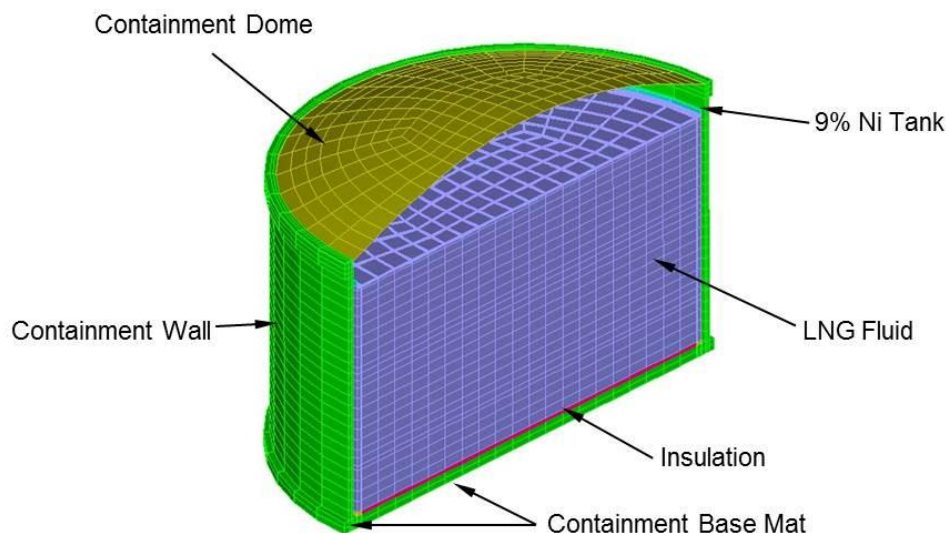
Obr. 4.7 Mapa se zásobníky zemního plynu v ČR[38]

4.2.1 Kryogenní skladování

Kryogenní skladování zemního plynu je jednou z možností pro uchování plynu využívající skladování v kapalném skupenství. Skladování kapalného plynu má výhodu v množství energie, která je uložena v relativně malém objemu, a však z ekonomického hlediska je výhodnější skladování plynu v jeho méně stlačených formách, jelikož zde nejsou tak velké náklady na chlazení nádrží. Důležité je také zmínit, že se tato metoda skladování zemního plynu v České republice nevyužívá.

Při této metodě skladování musí být zemní plyn v nádrži udržován při přibližné teplotě -162 °C , což je teplota varu metanu, jenž je hlavní složkou zemního plynu. Vzhledem k tomu, že kapalný zemní plyn zaujímá přibližně 600krát menší objem než v plynné podobě, je možné do zásobníku na kapalný plyn ukládat mnohem větší zásoby plynu, než u zásobníků pro skladování zemního plynu v plynném skupenství. Nevýhodou uvedeného způsobu skladování je nutnost neustále držet teplotu pod bodem varu metanu, což zvyšuje ekonomickou nákladnost skladování. Proto je nutná vysoká míra tepelné izolace nádrže, což u menších nádrží zajišťují dva pláště, mezi nimiž je vakuum.

U větších zásobníků (nad stovky tisíc metrů krychlových objemu) primární (vnitřní) obálku tvoří ocelová stěna s vysokým podílem niklu a hliníku nebo nerezová ocel navržená na hydrostatický tlak zkapalněného plynu v nádrži. Konstrukce sekundární (vnější) obálky je nejčastěji z předpjatého betonu. Dimenzována je na mimořádná vnější zatížení, zároveň musí zachytit kapalinu a výpary zevnitř zásobníku pro případ porušení primární obálky.[39]



Obr. 4.8 Schéma řezu velkého zásobníku na kapalný zemní plyn[40]

ZÁVĚR

Tématem této práce bylo popsat technologie pro zkapalňování zemního plynu a jeho následnou distribuci a využití.

Práci jsem rozdělil do čtyř hlavních částí. Každá část se zabývala tématem stanoveným v cílech bakalářské práce. První část se zabývá rešerší vývoje a stavu technologií. Zmiňuji zde postupné objevy vědců zabývajících se právě zkapalňováním plynů a dosahováním nízkých teplot. Z této kapitoly se dozvídáme, že za pomoci kryogenních technologií bylo dosaženo zkapalnění veškerých známých plynů a že se vědcům podařilo téměř přiblížit hodnotě absolutní teplotní nuly.

Ve druhé části uvádím různé oblasti lidského života a průmyslu, ve kterých se uplatňují zkapalněné plyny. Kapalné plyny nacházejí v oblastech jako lékařství, zemědělství, hutnictví či elektroprůmysl využití především díky své nízké teplotě. Speciální využití má pak kapalný zemní plyn, který se uplatňuje pro jeho vysoký energetický obsah při malém objemu při přepravě zemního plynu a jako pohonná látka. Právě jako pohonná látka má kapalný zemní plyn velký potenciál, jelikož má při daném objemu paliva větší dojezd a lepší ekologické parametry než většina ostatních kapalných paliv. V současné době se tak prosazuje především v dálkové nákladní a námořní dopravě.

Ve třetí části popisují průmyslové zkapalňování zemního plynu. Zjišťujeme, že pro průmyslovou výrobu zkapalněného zemního plynu je užíváno technologie kaskádového cyklu a jeho jednodušší varianty využívající kaskádového cyklu s vícekompresní směsí.

V závěrečné části charakterizují způsoby distribuce a skladování zkapalněných plynů. Obzvláště se zaměřuji především na způsoby distribuce kapalného zemního plynu, protože pro distribuci ostatních kapalných plynů se využívají stejné či podobné technologie (především v menších objemech). Nejpoužívanějším druhem přepravy zemního plynu je lodní doprava, kdy se využívá právě skutečnosti, že zkapalněný plyn je 600krát hustější, než ve své plynné fázi. Proto je možné přepravit mnohem větší množství energie. Dlouhodobé skladování zkapalněného zemního plynu v nádržích není příliš využíváno, především kvůli vyšším ekonomickým nákladům na chlazení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. THE HISTORY OF REFRIGERATORS AND FREEZERS. In: The inventors [online]. 2006 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://theinventors.org/library/inventors/blrefrigerator.htm>
2. THE HISTORY OF REFRIGERATORS. In Sundvik [online]. 2012 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.materials.sandvik/en/campaigns/fridge-of-the-future/the-history-of-the-refrigerator/>
3. JOULE-THOMPSONŮV JEV. In Techmania [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/plyny/joule-thomsonuv-jev>
4. JOULE-THOMPSON EFFECT. [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.nptel.ac.in/courses/112103016/module1/lec7/2.html>
5. CARL VON LINDE - DEVELOPER OF REFRIGERATORS AND GAS SEPARATION TECHNOLOGY. In World of chemicals [online]. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.worldofchemicals.com/304/chemistry-articles/carl-von-linde-developer-of-refrigerators-gas-separation-technology.html>
6. CARL VON LINDE AND WILLIAM HAMPSON – COOL INVENTIONS. In The chemical engineer [online]. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.thechemicalengineer.com/features/cewctw-carl-von-linde-and-william-hampson-cool-inventions/>
7. THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2001. In Nobel prize [online]. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2001/index.html
8. LEANHARDT, A. E.; PASQUINI, T. A.; SABA, M.; SCHIROTZEK, A.; SHIN, Y.; KIELPINSKI, D.; PRITCHARD, D. E., KETTERLE, W. Cooling Bose-Einstein Condensates Below 500 Picokelvin. Science [online]. American Association for the Advancement of Science, 2003 [cit. 2018-05-15]. Svazek 301, čís. 5639, s. 1513-1515. ISSN 1095-9203. DOI:10.1126/science.1088827. PMID 12970559.
9. FYZIKA NÍZKÝCH TEPLŮT [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3042211/>
10. BOSE EINSTEIN CONDENSATION [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: http://titan.physx.u-szeged.hu/~dpiroska/atmolfiz/bose_einstein_condensation.html

11. DEWAROVY NÁDOBY. In Verkon [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.verkon.cz/dewarovy-nadoby/>
12. KRYOCHIRURGIE-EINHEIT / FÜR DERMATOLOGIE / HAND. In Medical expo [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.medicaexpo.de/prod/cryoalfa-europe/product-68128-575041.html>
13. KAPALNÝ DUSÍK. In Messergroup [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.messergroup.com/web/messer-technogas-spol.-s.r.o./dusik-kapalny>
14. ZEMĚDĚLSTVÍ – KRYOGENNÍ ZMRAZOVÁNÍ A UCHOVÁNÍ SPERMATU A EMBRYÍ. In Air Liquide [online]. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://prumysl.airliquide.cz/potravinarsky-prumysl/zemedelstvi/kryogenni-zmrazeni-uchovani-spermatu-embryi>
15. TRANSPORT CHLAZENÝCH PRODUKTŮ. In Air Liquide [online]. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://prumysl.airliquide.cz/potravinarsky-prumysl/transport-chlazenych-produktu/serie-transportnich-postupu-s-neomezenym#content>
16. NOVÉ TECHNOLOGIE PRO ZVÝŠENÍ TRVANLIVOSTI POTRAVINÁŘSKÝCH VÝROBKŮ. In Hospodářské noviny [online]. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://archiv.ihned.cz/c1-836003-nove-technologie-pro-zvyseni-trvanlivosti-potravinarskych-vyrobku>
17. SUPRAVODIVOST – PRINCIP A VYUŽITÍ. In Oenergetice.cz [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/supravodivost-princip-a-vyuziti/>
18. WHY CAN'T WE FLY A PLANE TO SPACE? In Nasa.gov [online]. 2007 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/home/F_Why_Fly_Plane.html
19. FALCON HEAVY. In spacex [online]. 2017 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.spacex.com/falcon-heavy>
20. QUANTUM GYROSCOPE. [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://quantumgyroscope.weebly.com/overview.html>
21. HLINČÍK, Tomáš. Vlastnosti a využití zkapalněných uhlovodíkových plynů jako topných plynů [online]. VŠCHT [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://web.vscht.cz/~hlincikt/Z%C3%A1klady%20zpracov%C3%A1n%C3%AD%20a%20vyu%C5%BEit%C3%AD%20uhl%C3%AD%20a%20plynu/12.pdf>

22. ENERGETICKÉ ZDROJE VE SVĚTĚ. In viteztenazemi [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: http://www.viteztenazemi.cz/cenia/index.php?p=energeticke_zdroje_ve_svete&site=energie
23. HOW DO LIQUEFIED NATURAL GAS TRUCKS WORK [online]. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.afdc.energy.gov/vehicles/how-do-lng-cars-work>
24. LNG VS CNG. In cngplus.cz [online]. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.cngplus.cz/lng-vs-cng.html>
25. MAPA ČERPACÍCH STANIC LPG, CNG, LNG. In levnevozeni.cz [online]. [cit. 2018-05-15]. <http://www.levnevozeni.cz/cerpaci-stance-lpg-na-mape/>
26. LIQUIFIED NATURAL GAS AS FUEL FOR THE SHIPPING INDUSTRY. In marineinsight.com [online]. 2015 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.marineinsight.com/green-shipping/liquified-natural-gas-lng-as-fuel-for-the-shipping-industry/>
27. ZKAPALNĚNÝ ZEMNÍ PLYN (LNG) In Oenergetice.cz [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/plyn/zkapalneny-zemni-plyn-lng/>
28. CASCADE REFRIGERATION SYSTÉM [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Three-cascade-refrigeration-system-used-for-liquefaction-of-natural-gas_fig1_266869325
29. OPTIONAL AVAILABLE FOR THE LIQUEFACTION OF NATURAL GASES [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.airproducts.cz/~media/downloads/article/L/en-lng-selecting-a-suitable-process-article.pdf?industryItem=Industries&subIndustryItem=Energy&segment=LNG&applicationChildItem=lng-applications&productLevel3=Liquefaction-Process-and-Technology>
30. OTA, Josef. Kryogenní technika a její aplikace. ČVUT, Praha 2014, ISBN 80-01-02904-2, str. 57-59
31. LIQUIFIED NATURAL GAS. In maritimepropulsion.com [online]. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: [http://articles.maritimepropulsion.com/article/Liquefied-Natural-Gas-\(LNG\)-as-ship-fuel-1591.aspx](http://articles.maritimepropulsion.com/article/Liquefied-Natural-Gas-(LNG)-as-ship-fuel-1591.aspx)
32. LNG SPHERES AS SEA [online]. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://aoghs.org/transportation/hortonspheres/>

33. LNG IMPORT TERMINAL OFF THE COAST OF LIVORNO. In siemens.com [online]. 2017 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/press/en/presspicture/?press=/en/presspicture/2016/power-gas/2016-09-lng/im2016091020pgen.htm>
34. CRYOGENIC RAIL TANK CARS. In vtg.com [online]. 2015 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.vtg.com/wagon-hire/our-fleet/g91111d/>
35. LAHVE NA LPG. In primagas.cz [online]. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.primagas.cz/pro-firmy/lpg/lahve>
36. ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU. In eru.cz [online]. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/plyn/statistika-a-sledovani-kvality/rocn-zpravy-o-provozu>
37. ZÁSObNÍKY PLYNU V ČESKÉ REPUBLICĚ. In Oenergetice.cz [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/energeticka-legislativa-cr/zasobniky-plynu-v-cr/>
38. SKLADY ZEMNÍHO PLYNU V ČR [online]. 2014 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.petrolmedia.cz/aktuality/plynari-jsou-na-pripadnou-krizi-na-ukrajine-pripraveni-3825.aspx?nom=4725&vote=3>
39. MODERNÍ TECHNOLOGIE PRO SKLADOVÁNÍ ZEMNÍHO PLYNU. [online]. 2010 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/moderni-technologie-pri-vystavbe-zasobniku-na-zkapalneny-zemni-plyn/>
40. LNG ISOLATED STORAGE TANKS. [online]. 2017 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.scsolutions.com/structural/projects/lng-receiving-terminal-isolated-storage-tanks/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

LNG Liquified natural gas

LPG Liquified petrolleum gas

CNG Compressed natural gas

K Kelvin

°C Stupeň celsia

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Návrh prvního stroje na výrobu ledu [2].....	17
Obr. 2-2 Schéma Joule-Thompsonova jevu[4].....	18
Obr. 2-3 Zkapalňovač na výrobu kapalného vzduchu[6]	19
Obr. 2-4 Schéma magneticko-optické pasti a grafické znázornění Bose-Einsteinova kondenzátu[10]	20
Obr. 3-1 Dewarova láhev a její schéma [11]	21
Obr. 3-2 Bombička a nástavec na použití tekutého dusíku v kožní chirurgii[12]	22
Obr. 3-3 Schéma použití kapalného plynu jako paliva a oksyličovadla v raketě[18]	23
Obr. 3-4 Mapa produkce zemního plynu ve světě v (m^3 /rok)[22].....	25
Obr. 3-5 Znázornění pohonné jednotky kamionu poháněného LNG[23]	26
Obr. 3-6 Nádrž na LPG u kamionu[24]	26
Obr. 3-7 Rozmístění veřejných čerpacích stanic na LNG v ČR[25]	27
Obr. 3-8 Rozmístění veřejných čerpacích stanic na LPG a CNG v ČR[25]	27
Obr. 3-9 Loď poháněná kapalným zemním plynem[26]	28
Obr. 4-1 Schéma klasického kaskádového cyklu a jeho chladicí křivky[28].....	29
Obr. 4-2 Schéma kaskádového cyklu s vícekomponentní směsí a předchlazení propanem[29]	30
Obr. 4-3 Chladicí křivka při zkapalňování pomocí kaskádového cyklu s předchlazením propanem[27].....	31
Obr. 5-1 Schéma postupného zpracování a distribuce zemního plynu[31]	32
Obr. 5-2 Schéma tankeru na převážení zkapalněného zemního plynu[32]	33
Obr. 5-3 Terminál pro přijímání kapalného zemního plynu v Itálii[33]	33
Obr. 5-4 Železniční cisterna na přepravu kapalných plynů[34]	34
Obr. 5-5 Lahve na kapalné plyny[35].....	35
Obr. 5-6 Porovnání spotřeby plynu za roky 2013 a 2014[36]	36
Obr. 5-7 Mapa se zásobníky zemního plynu v ČR[38]	36
Obr. 5-8 Schéma řezu velkého zásobníku na kapalný zemní plyn[40]	37