



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND



Eesti Maaülikool

Estonian University of Life Sciences

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**LNG GAASISTAMISEL TEKKIVA
JÄÄKJAHUTUSENERGIA KASUTAMINE**

UTILIZING WASTE COOLING ENERGY FROM LNG REGASIFICATION

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Sander Orasi

Üliõpilaskood: 153275AAHM

Juhendaja: Eduard Latõšov

Tallinn 2017

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“24” mai 2017

Autor:
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“24” mai 2017

Juhendaja:
/ allkiri /

Kaitmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsemiskomisjoni esimees
/ nimi ja allkiri /

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Sander Orasi	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> LNG gaasistamisel tekkiva jääkjahutusenergia kasutamine	
<i>Kuupäev:</i> 24.05.2017	67 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja:</i> Eduard Latõšov	
<p><i>Sisu kirjeldus:</i> Veeldatud maagaas leiab üha laialdasemat kasutust ning tarbimismahtude kasvu on oodata ka tulevikus. LNG tootmisprotsessi käigus, kus gaas veeldatakse jahutusprotsessi abil, alandatakse selle temperatuur -162°C ning kulutatakse ära suurel hulgal energiat. Taasgaasistamisel aga tarbitakse vedeliku aurustamiseks väliskeskonna soojusenergiat ning reeglina jääb kütuse jahutusenergeetiline potentsiaal kasutamata.</p> <p>Lõputöö on koostatud, et uurida veeldatud maagaasi taasgaasistamisel tekkivat jahutusenergia hulka, selle muutumist sõltuvalt jahutusprotsessides kasutatavatest temperatuuridest ja hinnata idee otstarbekust võrreldes kompressormasinatega jahutusenergia tootmisega.</p> <p>Töö käigus on kajastatud LNG tootmisprotsesse, kvaliteeti, hoiustamist ning gaasistamist. Samuti on uuritud jääkjahutusenergia hulkade kirjeldamise seisukohalt olulisi teemasid nagu faasimuutus ja erisoojus. Võrdluste koostamise eesmärgil on tutvutud teoreetiliselt jahutusprotsessidega ning energia ülekandmise seisukohalt soojusvahetitega. Töös on leitud LNG-st saadavad jahutusenergia potentsiaalid kütuses sisalduva energiaühiku ja ka massiühiku kohta. Selgub, et 1 tonnist LNG-st on võimalik saada 0°C jahutusenergia puhul teoreetiliselt ligikaudu 240 kWh jahutust. Sellest 60% on saadaval juba ainuüksi faasimuutuse protsessi käigus ning ülejäänud 40% jahutusenergiast eraldub LNG-st temperatuuri tõusuga.</p> <p>Viimases osas on koostatud arvutused kahe Eesti ettevõtte näitel. Nad tarbivad juba stabiilselt LNG-d ning toodavad jahutusenergiat kompressormasinate abil, kuid ei ühilda neid protsesse. Reaalsete tarbimisandmete baasil on töö käigus leitud võimalikud jahutusenergeetilised mahud LNG-st ning kokkuvõid nii majanduslikust kui ka keskkondlikust aspektist. Tulemusi on võrreldud ettevõtete ja jahutusenergia tootmise alternatiividega, milleks on kompressormasinatega jahutuse tootmine. Selgub, et keskkonnasääst ja kokkuvõid elektrienergiasse tuleks seda suurem, mida madalamatel temperatuuridel töötavaid kompressorseadmeid suudetakse LNG jääkjahutusenergiaga asendada.</p> <p>Järeldub, et LNG taasgaasistamisel vabaneva jahutusenergia kasutusele võtmisel on suur potentsiaal nii rahalise säästu suurendamises kui ka kasvuhoonegaaside vähendamises.</p>	
<i>Märksõnad:</i> LNG, gaasistamine, aurustumine, jahutus, jääkenergia kasutus, energia kokkuvõid, keskkonnasäästlikkus.	

Summary of the Diploma Work

<i>Author:</i> Sander Orasi	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Utilizing waste cooling energy from LNG regasification	
<i>Date:</i> 24.05.2017	67 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>Faculty:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Associate Professor Eduard Latõšov	
<i>Abstract:</i> <p>The use of liquefied natural gas (LNG) is progressively gaining popularity in today`s world. As a result, the volume of consumption is expected to increase in the future. During the production of LNG, a large amount of energy is used to convert natural gas into liquid by cooling it to approximately $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$. Moreover, for re-gasification ambient thermal energy is consumed to evaporate the liquid back into the gaseous state. Consequently, leaving the fuels` cooling potential completely unused.</p> <p>The purpose of the current thesis is to analyze the amount of cooling energy released from LNG re-gasification depending on the temperatures used in the process and evaluate the feasibility compared to the conventional cooling via the refrigeration cycle.</p> <p>The paper reflects the methods for LNG production, quality, storage and gasification. In addition to that, important topics such as phase-change and specific heat have been discussed to describe the amounts of waste cooling energy. In order to draw comparisons, the theoretical cooling process and energy transfer via heat exchangers have been thoroughly researched by the author. Cooling energy potentials from LNG have been found both in mass and energy units. It appears that from one metric ton of LNG it is possible to gain 240 kWh of zero-degree cooling energy. About 60 per cent of the cooling energy releases due to the phase-change and the rest is released from temperature rise.</p> <p>The final part of the thesis includes calculations by the example of two Estonian companies. Presently they are constantly consuming LNG, but generating cooling energy via traditional refrigeration cycle. Based on the actual consumption data and the solutions provided in the first part of the thesis, both economic and environmental benefits can be achieved from the cooling energy potential of LNG. The results of the research clearly indicate that the lower the temperature outputs are, the more reasonable it is to apply LNG cooling potential rather than conventional refrigeration devices. As a result, the energy use is more sustainable and has a significant effect on reducing greenhouse gas emissions.</p>	
<i>Keywords:</i> LNG, regasification, evaporation, cooling, waste energy, environmental sustainability.	

Sisukord

Lõputöö ülesanne	6
Teema põhjendus:.....	6
Töö eesmärk:.....	7
Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:.....	7
Lähteandmed:.....	7
Eessõna	8
Sissejuhatus	9
1. Veeldatud maagaasi omadused ja käitamise üldiseloolumustus	11
1.1. Omadused.....	12
1.2. Tootmine.....	14
1.3. Kvaliteet.....	15
1.4. Transport ja hoiustamine.....	19
1.5. Gaasistamine.....	21
2. Jääkjahutusenergia kasutamise teoreetilised alused	24
2.1. Faasisiirded.....	25
2.2. Erisoojus ja tihedus.....	26
2.3. Jahutusprotsessid.....	30
2.4. Soojusvahetid.....	33
2.5. Jahutusenergia potentsiaal energia ja massiühiku kohta.....	36
3. LNG-st jahutusenergia tootmise otstarbekuse ja võimalikkuse hinnang ettevõtete näitel	42
3.1. Saaremaa jaama näitel jahutusenergia potentsiaal.....	42
3.1.1 Energiakaod jahutusenergia ülekandmisel.....	45
3.2. Jahutusenergia potentsiaal Paide pagaritööstuse sügavkülmutuse näitel.....	47
3.2.1 Energiakaod jahutusenergia ülekandmisel.....	49
3.3. Jahutamise tehnoloogilised võimalused.....	50
3.4. Kokkuvõid.....	51
Kokkuvõte	53
Kirjandus	58
Lisad	63
L.1. Peterhofi LNG terminalist tankimise väljavõte.....	63
L.2. Paide LNG mahuti skemaatiline eskiis.....	64
L.3. Ettevõtte Chart Industries pakutavate mahutite tüübid ja andmed.....	65
L.4. Atmosfäärirõhul oleva metaani erisoojuse ja tiheduse muutus sõltuvalt temperatuurist.....	66
L.5. Uponor torustiku dimensioneerimine.....	67

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	LNG gaasistamisel tekkiva jääkjahutusenergia kasutamine
Üliõpilane:	Sander Orasi, 153275AAHM
Lõputöö juhendaja:	Eduard Latõšov
Eriala:	Hajaenergeetika
Lõputöö liik:	Magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Eduard Latõšov
Lõputöö esitamise tähtaeg:	25.05.2017

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Instituudi direktor (allkiri)

Teema põhjendus:

Antud teema on aktuaalne, kuna järjest populaarsemaks muutuva ja rohkem kasutust leidva veeldatud maagaasi (edaspidi LNG) gaasistamisel tekkiv jääkjahutusenergia ei leia siiani hetkel piisavalt otstarbekat kasutust. LNG gaasistamise protsessis saadav jahutusenergia võimaldab vähendada energiatarvet, sõltuvust teistest kütustest või energiaallikatest, saavutada primaarenergia kokkuhoidu ning vähendada energiatootmise kulusid. Suurim perspektiiv antud teema kohta on tööstustel, kes kasutavad hoonete kütteks või tootmisprotsessis soojusenergia tootmiseks veeldatud maagaasi ning vajavad samuti ka toodete valmistamiseks või säilitamiseks jahutusenergiat (näiteks toiduainetööstused). Huvi antud teema kohta on ülesse näidanud Jetgas OÜ, kelle põhitegevus on veeldatud maagaasi import ja müük Balti riikides ning kellel on reaalne huvi pärast töö valmimist antud ideega edasi minna. Isegi Euroopa komisjoni eelnõu identifitseerib LNG taasgaasistamise näol jääkjahutuse kui suure potentsiaali energia kokkuhoius [1]. Euroopa direktiivid näevad ette, et tuleb minna üle rohkem energiatõhusale majandusele ning saavutada primaarenergia kokkuhoid [2].

Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on uurida veeldatud maagaasi gaasistamisel tekkiva jahutusenergia potentsiaali, koguseid, selle kasutusvõimalusi tööstustes ja hinnata, kas selle energia abil on võimalik asendada osaliselt või täielikult ettevõtete praegust jahutusenergia tootmist.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Töö käigus tuleb leida metaani erisoojus, võrrelda selle sõltuvust temperatuuri muutumisest, arvutada välja LNG gaasistamisel tekkiv jahutusenergia potentsiaal, võrrelda seda tööstustes tarbitavate mahtudega ning alternatiivsete jahutusseadmete energiatarbega. Selgitada välja, kas ja kui suur oleks jahutuse tootmise kokkuvõtte ning kas pakutud jääkjahutusenergia kasutamine oleks majanduslikult otstarbekas.

Lähteandmed:

Andmed ning teoreetilised alused leitakse raamatutest, artiklitest ja andmebaasidest. Abi reaalse olukordade ja näidete loomisel saadakse LNG müügi, transpordi ning veeldatud maagaasi tarbivate ettevõtete tegevust ja andmeid analüüsides.

Eessõna

Antud lõputöö teema on kujunenud välja ettevõtte Jetgas OÜ reaalsest huvist LNG gaasistamisel tekkiva jahutusenergia kasutamisest. Firma Jetgas OÜ tegeleb LNG impordiga Balti riikidesse ning pakub täislahendusi veeldatud maagaasi tarbijatele. Autorile antud idee soovitaja ning ka juhendaja on Tallinna Tehnikaülikooli dotsent Eduard Latõšov. Lõputöö koostamine toimus tudengi enda iseseisva tööna, mille käigus kogus ta lähtematerjale nii gaasi importivate kui ka jahutusenergiat tootvate firmade käest. Reaalsete näidete loomiseks on koostööd tehtud ka gaasi tarbivate ettevõtetega, mille abil on saadud andmeid juba eksisteerivate jahutusprotsesside ning tarbitavate koguste kohta. Lisaks on kogutud palju muud lisamaterjali, mille abil on jõutud töö tulemuseni.

Autor tänab oma töös teda aidanud inimesi Jetgas OÜ-st: Janek Parkman`i ja Toivo Ardel`it, kes on abistanud andmete leidmise ja kontaktide hankimisega. Samuti suurimad tänud lõputöö juhendajale Eduard Latõšovile, kes oli töö koostamisel igati toetav ning oli valmis õpilast probleemide korral juhendama.

Sissejuhatus

Tänapäeval on aina prioriteetsemaks muutunud energia kokkuvõid, keskkonnasäästlikkus ja tootmisprotsesside efektiivsemaks muutmine. Samuti peetakse üha tähtsamaks energia julgeoleku küsimust ning toetatakse protsesse, mis suurendavad seda ning muudavad alternatiivide valikut laiemaks. Üks selliseid energiaallikaid on veeldatud maagaas (inglise keeles *liquefied natural gas*, edaspidi LNG), mis on vedelale kujule viidud toorgaas (tavaliselt maagaas). Seeläbi väheneb toote maht ning seda on võimalik edukalt transportida ühest maailma otsast teise, ilma toruliine rajamata.

Töö eesmärgiks on uurida LNG taasgaasistamisel tekkivat jahutusenergia hulka, selle muutumist sõltuvalt jahutusprotsessi käigus tarbitavatest temperatuuridest, hinnata idee otstarbekust ja võimalikkust võrreldes seda enamlevinud jahutusenergia tootmise alternatiiviga, milleks on kompressormasinatega jahutusenergia tootmine.

Töö olulisus kasvab aastast aastasse, kuna LNG tootmise ja tarbimise mahud aina suurenevad, aga tarbimisel tekkivat jääkjahutusenergiat ei kasutata ära, vaid jahutatakse ümbritsevat keskkonda. Euroopa direktiivid näevad ette, et tuleb minna üle rohkem energiatõhusale majandusele ning saavutada primaarenergia kokkuvõid. Samuti seatakse piire ning on võetud eesmärgiks vähendada kahjulike kasvuhoonegaaside tekkimist. Töös tõstatatava idee abil on võimalik kokku hoida elektrienergiat ja vähendada selle tootmisel tekkivat CO₂ hulka. Antud suurused leitakse töö käigus ning samuti arvutatakse välja võimalik tekkiv majanduslik kasum selle protsessi käitamisel, kus kasutatakse ära LNG gaasistamisel tekkiv jahutusenergia.

Lõputöö koosneb kolmest peatükist, mis koosnevad omakorda alapeatükkidest. Andmete analüüsimiseks ja arvutusprotsesside selgitamiseks kasutatakse töö koostamise käigus programmi Microsoft Excel. Töö alguses püstitatakse lõputöö ülesanded ning peatükid võtab kokku lõputöö kokkuvõtte. Töö lõpus tuuakse välja kasutatud kirjanduse loetelu ning viimases osas on viis lisa ilmestamiseks töö sisuosa mahukamaid andmeid.

Töö esimeses osas (pt 1. Veeldatud maagaasi omadused ja käitamise üldiseloostus) kirjeldatakse LNG-d puudutavaid üldiseid aspekte, kus on sõnastatud selle olemus, kasutamise trendid, tootmise protsess ja selle juures olulised kvaliteeditingimused. Samuti kajastatakse LNG väärtusahela olulisi osasid: transporti, hoiustus- ja tarbimislahendusi nii suurte terminalide kui ka Eestis olemasolevate taasgaasistite näol.

Aruande teises osas (pt 2. LNG jääkjahutusenergia kasutamise teoreetilised alused) kirjeldatakse LNG võimaliku jahutusenergia potentsiaali väljaselgitamiseks olulisi algskomponente ja suurusi, samuti teoreetilisel baasil jahutusprotsesse ning selle ülekandmiseks vajalikke komponente. Alampeatükkides kajastatakse arvutusprotsessis vajalikke suurusi, nagu aurustumissoojust ning erisoojuse ja tiheduse muutumist sõltuvalt temperatuurist. Kirjeldatakse ka jääkjahutusenergia kasutamiseks vajalikke ülekandmise vahendeid – soojusvaheteid. Iga tarbija juures on vajalik projekteerida just neile sobilik süsteem ning jahutusenergia ülekandmise lahendusi on soojusvahetite näol palju.

Teise osa lõpus pannakse kokku eelnevad teadmised ja selgitatakse välja teoreetilistel alustel jahutusenergia potentsiaal LNG kütuseenergia ja massiühiku kohta. Massiühikuna võrreldakse 1 kilogrammi veeldatud gaasi kohta saadavat jahutusenergia potentsiaali ning sõltuvust sellest, mis temperatuurilist energiat tarvitatakse. Energiaühiku kaudu kajastatakse võrdlus gaasis sisalduva soojusenergia hulga ja saadava jahutusenergia potentsiaali kohta.

Töö arvutusprotsessid koostatakse puhtale metaanile, kuna see on LNG peamine komponent ning LNG koostis sõltub üle maailma tootjatest ning toorainest. Näiteks Eestisse imporditud produktis on üle 97% metaani ning ainult 3% ulatuses teiste gaaside segusid. Seega leitud tulemid ei ole täiesti samad, kuid on vägagi võrreldavad.

Lõputöö kolmandas osas (pt 3. LNG-st jahutusenergia tootmise otstarbekuse ja võimalikkuse hinnang ettevõtete näitel) rakendatakse teises osas toodud teoreetilisi aluseid ja selgitatakse välja kahe Eestis töötava ettevõtte kaudu reaalsed jahutusenergia potentsiaalid. Nendeks on AS Saaremaa Piimatööstus ja Paides asuv AS Eesti Pagar. Mõlemad firmad kasutavad oma soojusvajaduste katmiseks LNG-d. Samuti tarbivad ettevõtted stabiilselt aastaringselt suurtes kogustes jahutusenergiat. Ettevõtetes tarbitavate jahutusenergia temperatuuride vahe on suhteliselt suur ning samuti on ka erinevusi hetkel jahutust tootvate kompressormasinate andmete näol. Seeläbi on antud ettevõtete baasil hea kajastada LNG jahutusenergia koguseid, selle paindlikkust, optimaalsust ja ökonoomsust.

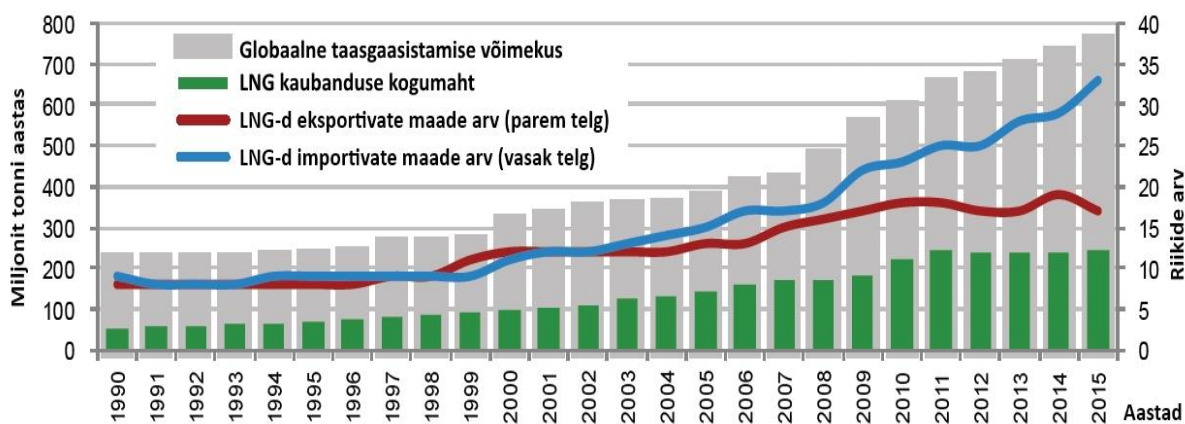
Töö tulemuste alusel saab aimu LNG enamasti kasutamata jahutusenergeetilisest potentsiaalist, gaasistamisel tekkivatest jahutusenergia hulkadest ning selle sõltuvusest jahutustemperatuuri muutumisel. Samuti selgub võimalik kokkuvõid keskkonna seisukohalt ning tasuvus majanduslikust aspektist võrreldes jääkjahutusenergiat jahutuse alternatiividega, kompressormasinatega. Seeläbi on võimalik teha järeldusi töös püstitatud idee otstarbekusest.

1. Veeldatud maagaasi omadused ja käitamise üldiseloomustus

Veeldatud maagaas (inglise keeles *liquefied natural gas*, edaspidi LNG) on toorainena täpselt sama gaas, mis ka mööda toru gaasivõrkudes üle Eesti tarbijateni jõuab. Erinevus seisneb selles, et LNG on jahutatud temperatuurini, mille puhul muutub tema olekufaas ning ta kondenseerub vedeliku faasini. Antud kütust kasutataksegi enamasti paikades, kus maagaasi võrku pole rajatud või seal, kus tahetakse suurendada varustuskindlust.

LNG-l on juba üle sajandi pikkune ajalugu, kuid laialdasem kasutusele võtmine on toimunud viimaste aastakümnete jooksul. Maagaasi LNG-ks muutmise tehnoloogia töötati välja Saksamaal 1893. aastal, kuid esimene gaasi kaubandusliku veeldamise tehas rajati alles 1941. aastal [3]. 1959. aastal valmis esimene LNG tanker, mis kandis LNG-d USA-st Suurbritanniasse. LNG tehnoloogia lihviti tänapäevasele tasemele Kaug-Idas, esmalt Jaapanis ja seejärel Koreas ning Taivanis, kus praktiliselt kogu maagaas imporditakse veeldatud kujul [4]; [5].

LNG on muutunud aastatega üha populaarsemaks ning seda trendi on näha ka tulevikus. LNG tootmisüksuste võimekused on mitmekordistunud viimase paarikümne aastaga. See tuleneb sellest, et ka gaasi importivate riikide arv on viimase 10 aasta jooksul kahekordistunud. Jooniselt 1.1 võib siiski järeldada, et üleilmselt LNG taaskaasistusjaamadel on veel suur varu ehk potentsiaalsed võimsused ületavad kõvasti reaalset tänapäevast vajadust. 2015. aastal jäi LNG müük 250 miljonit tonni lähedale, 2000. aastal oli see vaid 100 miljonit tonni ning 1990. aastal 50 miljonit tonni.



Joonis 1.1– LNG kaubanduse trend 1990-2015 aastatel [6]

Regionaalselt omavad suurimat ekspordivõimekust Lähis-Ida (~90 miljonit tonni aastas), Aasia (80 miljonit tonni aastas) ja Aafrika (~50 miljonit tonni aastas). LNG-d eksportivate riikide poolest on tuntuim ja suurimat turuosa omav Katar (31,8%), järgnevad Austraalia (12%) ja Malaisia (10,2%). Protsentuaalsed tulemused pärinevad 2015. aasta statistikal [6]. Katar on turu liidriks pürginud alles 1996. aastast, kus tuli turgudele oma esimeste tootmisvõimsustega. Edasi on järgnenud kiire kasv tootmismahitudelt, kus omandas 18 aastaga üle 30% turu osakaalust, mis on vaieldamatult suurim [6].

Euroopa gaasituru tulevikuvaated on samuti LNG suunas – Venemaa ja Norra toodetavad kogused jäävad eelduste kohaselt stabiilseks, lähiajal kukub Euroopa gaasi sisetoodang ning kasvab veeldatud maagaasi import. LNG mahud peaksid Euroopas 2035. aastal Shelli uuringute kohaselt olema 2 korda suuremad kui 2010. aastal ehk ligi 150 miljardit kuupmeetrit (gaasilises faasis nm^3) aastas [7].

1.1. Omadused

LNG on krüogeenne (temperatuuril alla $-150\text{ }^\circ\text{C}$), läbipaistev, värvitu, lõhnatu, mittemürgine, mittekorrodeeriv vedelik. LNG tüüpilised füüsikalised omadused on toodud alljärgnevas tabelis 1.1.

Tabel 1.1 LNG omadused [8]

Parameeter	Ühik	Väärtus
Keemispunkt	$^\circ\text{C}$	-160 ... -162
Tihedus	kg/m^3	391 ... 485
Erisoojusmahtuvus	$\text{kJ}/\text{kg}/^\circ\text{C}$	2,2 ... 3,7
Viskoossus	cP	0,11 ... 0,18
Soojusjuhtivus	$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$	0,19 ... 0,22
	MJ/kg	48,15
Alumine kütteväärtus	MWh/m^3	5,63
	MWh/t	13,38

LNG erikaal on ligikaudu 50% vee erikaalust. LNG koosneb põhiosas metaanist, millele lisandub väikestes kogustes etaani, propaani, butaani ja lämmastikku [9]. Metaan on õhus kergem lõhnata gaas, mistõttu võimaliku lekke korral lendub see atmosfääri. Plahvatusohtlik on metaani kontsentratsioon õhus vahemikus ainult 5-15%, mille iseeneslik teke on äärmiselt

vähetõenäoline. Tänu ülimaldale temperatuurile LNG ei põle, mis teeb selle transportimise ja säilitamise suhteliselt ohutuks [10].

Võrdlevas tabelis 1.2 on toodud tüüpilised maagaasi ja LNG koostised komponentide kaupa.

Tabel 1.2 – Maagaasi ja LNG tüüpilised koostised [11]

Koostisaine	Maagaas	LNG
Metaan CH ₄	88,860	91,10
Etaan C ₂ H ₆	4,240	4,30
Propaan C ₃ H ₈	1,140	3,00
Butaan C ₄ H ₁₀	0,424	1,40
Pentaan C ₅ H ₁₂	0,126	0,00
Heksaan C ₆ H ₁₄	0,081	0,00
Heptaan C ₇ H ₁₆	0,024	0,00
Oktaan C ₈ H ₁₈	0,003	0,00
Lämmastik N ₂	4,006	0,20
Süsihappegaas CO ₂	1,096	0,00

Lisas 1 on toodud ka reaalne gaasi analüüs, mida Eestisse impordib Jetgas OÜ. Sealses LNG-s on üle 97% metaani (molekulaar %).

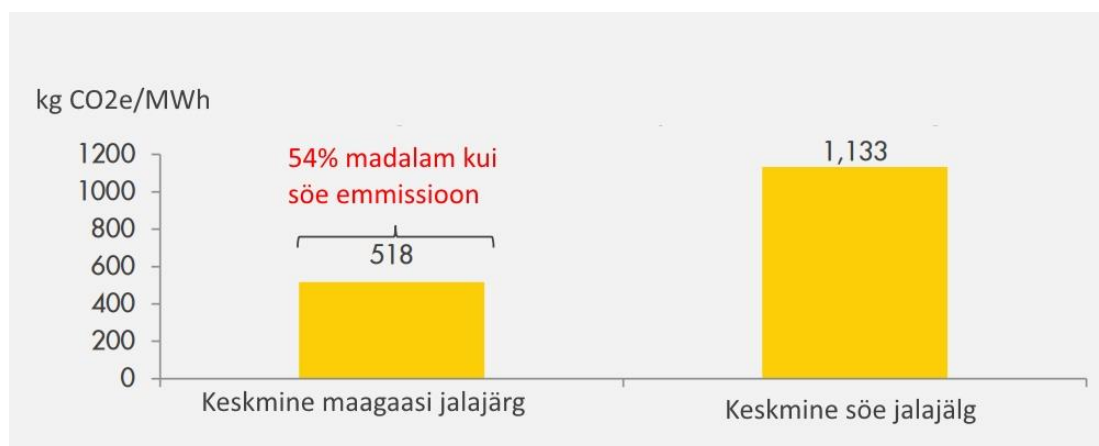
Maagaas on fossiilsetest kütustest eelistatavim eelkõige tema peaaegu olematu väävlisisalduse tõttu. Tabel 1.3 võrdleb maagaasi kivisöe ja kütteõlidega, kus selgub, et väävlisisaldus ja SO₂ heitmete eraldumine kütuseid põletades on maagaasil ligi tuhandeid kordi väiksemad.

Tabel 1.3 Maagaasi võrdlus teiste fossiilsete kütustega [12]

Kütus	Väävlisisaldus g/kg	SO ₂ eraldumine g/KWh
Kivisüsi	10	3,5
Kerge kütteõli	3-10	0,5
Raske kütteõli	20-30	4,5
Maagaas	alla 0,0001	0,004

Maagaasi täielikul põlemisel ei eraldu CO-d. Maagaasi põlemisel ei saastu keskkond tahma ega raskemetallidega. Selle põhikomponendi - metaani - täielikul põlemisel tekib CO₂ ja vesi, seega on see üks puhtamaid kütuseid [12].

Shell kompanii välja antud LNG aastaaruandes võrreldakse gaaskütusel ja söel töötavaid jaamu. Selgub, et gaasi tarbivatel jaamadel on toodetud MWh energiaühiku kohta 54% väikesem keskkonna jalajälg kui sütt tarbivatel jaamadel (joonis 1.2).



Joonis 1.2 – Eralduva CO₂ arvelt kliimasoojenemist põhjustav potentsiaal maagaasil ja söel [7]

1.2. Tootmine

LNG tootmine toimub looduslikust gaasist ehk maagaasist, mis on jahutatud faasimuutuseni, kus gaasi veeldub. Antud üleminek toimub atmosfääri rõhul (101.325 kPa) temperatuuril -162°C. Selles veeldamise protsessis väheneb gaasi maht võrreldes normaaltingimustega ca 600 korda. Tabel 1.4 kajastab tüüpilisemate gaaside keemispunkti temperatuure [13].

Tabel 1.4 Keemispunktid populaarsematel gaasidel [14]

Temperatuur, °C	Olek
100	Vesi keeb
-0,5	Butaan keeb
-33	Ammoniaak keeb
-42	Propaan keeb
-162	LNG keeb
-183	Hapnik keeb
-195	Lämmastik keeb
-252	Vesinik keeb
-270	Heelium keeb
-273	Absoluutne null

Enne maagaasi veeldamist eemaldatakse sellest kõik sellised komponendid, mis võivad veeldamisseadmeid korrodeerida või ummistusi tekitada. Seetõttu võib LNG-d pidada veelgi puhtamaks, kui seda on tavapärane maagaas (vt tabel 1.2.). Puhastatud maagaasi temperatuur alandatakse kompressorkülmutusseadmetega alla $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ (atmosfäärirõhul) ning saadud vedelas olekus maagaas juhitakse LNG-hoiumahutisse [11].

Maagaasi veeldamise jaama töö võib jagada viite põhi protsessitüüpi:

- 1) Eeltöötlus – eeltötluse protsessis eraldatakse gaasist soovimatud ained gaasimaardlas ning gaas separeeritakse.
- 2) Happeliste gaaside eraldus – kui maagaasi ammutatakse gaasimaardlates, siis sisaldab see keskkonnasaastajaid, nagu näiteks vesiniksulfiid (H_2S) ja süsinikdioksiidi (CO_2). Need ained absorbeeritakse ja eemaldatakse maagaasist amiini absorbeeriga (happegaasi eemaldi) abil. Kasutades väävlieemaldamise seadet, eraldatakse väävel vesiniksulfiidist eemaldatud saasteainetest.
- 3) Veeärastus – absorbenti kasutades eemaldatakse vesi maagaasist. Nii ei teki edasises veeldamise protsessis jääd.
- 4) Veeldamine – kuna gaas jahutatakse niivõrd madalatele temperatuuridele, alla -160°C , siis on protsessi sisse viidud väga suur hulk energiat.
- 5) Raskete õlide separeerimine – raskete ühendite separeerimine on oluline protsess LNG tootmise juures [15].

Maagaasi veeldamiste jaamu on mitut tüüpi. Enamlevinud meetoditeks on C3-MR; AP-X, Philips kaskaad; DMR (Shell) ja SMR meetodid. Need erinevad omavahel peamiselt külmutusagenside, nende segude valiku ja kompressormasinate tüüpide poolest [15]. Kõik eelnimetatud meetodid vajavad suuri kompressorseadmete võimsusi. Väga suurte jaamade puhul on kasutust leidnud gaasiturbiinid või töötab LNG tootmistehas tuumajaamade kõrvalharuna [16]. See energia, mis maagaasi sisse antakse faasi muutumise eesmärgil ei ole hetkel taasgaasistamisel kasutatav [15].

1.3. Kvaliteet

Sõltuvalt LNG kasutusvaldkonnast peab jälgima selle kvaliteeti. Põletusseadmes gaasi põletades ei ole kvaliteet niivõrd esmane, seal loeb kõrge kütteväärtus. Kuid samas ei tohi muutuv kvaliteet kütuses põhjustada ohtlike hapete tekkimist seadmetes ega suurendada kasvuhoonegaaside tekkimist. Näiteks uued metaanil töötavad autod on aga nõudlikud gaasi

kvaliteedi osas – väga oluline on oktaanarv. Sellest sõltub mootorite süüteprotsess, kui oktaanarv on liialt madal, siis võib tekkida iseeneslik süttimine ning detonatsioon, mis on mootorile kahjulik. Samuti on mootori võimekus ja kütusekulu otseselt seotud kütuse kvaliteediga [17].

Kuna LNG tooraine on reeglina maagaas (võib toota ka biometaanist [18]), siis toote kvaliteet sõltub ka algmaterjalist ehk ammutatavast toorgaasist. Kui võrrelda Saksamaa ja Hollandi maagaasi Venemaa maagaasiga, siis selgub kohe, et Venemaa maagaas on heade näitajatega. See tähendab, et puhtus teistest gaasidest on suur - metaani hulk 97,9%. Saksamaa enda gaasil on keskmiselt 88% metaani ja Hollandil 81,3% metaani, lisaks on viimastel ka suur lämmastiku sisaldus (14%) [12].

LNG tootmisprotsessi käigus teostatakse ka gaasile puhastus, see tähendab, et eraldatakse üleliigsed komponendid normide piiresse. Kuna maagaasi veeldatakse tänu jahutamisele, siis saab seda ära kasutada ka gaasi puhastamisel. Seda seetõttu, et kõik koostisosad peale lämmastiku veelduvad kõrgematel temperatuuridel kui metaan. Seega toimub puhastus ka maha jahutamise protsessi käigus, kus järk-järgult eraldatakse gaaside segust fraktsioone ning saavutatakse kõrge kvaliteet. Gaaside eraldamisel on olulised näitajad keemistemperatuur ja tihedus. Maagaasi segust enamlevinud gaasidel on need näitajad kajastatud alljärgnevas tabelis 1.5.

Tabel 1.5 – Gaaside keemispunkt ja tihedus atmosfäärirõhul (101.325 kPa) [17]

Aine	Keemistemperatuur [°C]	Vedeliku tihedus [kg/dm³]
Lämmastik	-195,8	0,810
Metaan	-161,5	0,421
Etaan	-88,6	0,546
Propaan	-42,0	0,585
N-butaan	-0,5	0,600

Sõltuvalt veeldamise protsessist, mahuti suuruselt, teistest praktilistest ja majanduslikest kaalutlustest terminalis võivad LNG-sse jääda mõned kõrged süsivesinikud alles.

Järgnevas tabelis 1.6 on toodud keskmised LNG omadused maailma tootjate kaupa. Tabelis on võrreldud nii metaani, lämmastiku, propaani ja etaani sisaldusi kui ka kütteväärtusi erinevate tootjate gaaside vahel. Samuti on kajastatud tabelis ka *Wobbe* indeks, mis on näitaja, millega iseloomustatakse ka küttegaase nagu näiteks maagaas ja petrooleumgaasid.

Wobbe indeks saadakse läbi alljärgneva valemi:

$$I_w = \frac{V_c}{\sqrt{G_s}} \quad (1.1)$$

kus I_w – Wobbe indeks;

V_c – ülemine kütteväärtus;

G_s – specific gravity ehk erikaal.

Tabel 1.6 – Ülemaailmsed keskmised LNG koostised [19]

	N₂	CH₄	C₂H₆	C₃H₈	Kõrged süsivesinikud	Kütteväärtus	Wobbe indeks
	%	%	%	%	C₄₊%	MJ/m³	MJ/m³
Alžeeria-Arzew	0,56	87,98	9	1,99	0,47	41,68	52,62
Alžeeria-Bethioua	1,2	87,59	8,39	2,12	0,7	41,01	51,96
Alžeeria-Skikda	1,02	91,19	7,02	0,66	0,11	39,87	51,42
Egiptus-Damietta	0,08	97,7	1,8	0,22	0,2	38,39	51,03
Egiptus-Idku	0	97,2	2,3	0,3	0,2	38,61	51,19
Liibüa	0,69	81,57	13,38	3,67	0,69	44,02	53,82
Nigeeria	0,08	91,28	4,62	2,62	1,4	41,76	52,87
Abu Dhabi	0,29	84,77	13,22	1,63	0,09	42,45	53,16
Oman	0,35	87,89	7,27	2,92	1,57	42,73	53,27
Katar	0,36	90,1	6,23	2,32	0,99	41,58	52,65
Trinidad	0,03	96,82	2,74	0,31	0,1	38,82	51,29
USA-Alaska	0,17	99,73	0,08	0,01	0	37,75	50,62
Austraalia-NWS	0,09	87,39	8,33	3,35	0,84	42,74	53,4
Brunei	0,05	90,61	4,97	2,89	1,48	42,09	53,06
Indoneesia-Arun	0,06	91,16	6,01	1,84	0,93	41,32	52,64
Malaisia	0,16	91,15	4,96	2,79	0,94	41,52	52,7

LNG koostise tundmine on oluline, kuna protsessist kättesaadav jahutusenergia kogus võib olla erinev. Tabelit 1.6 jälgides on näha, et kõige metaanirikkam kütus on USAs Alaska LNG,

kus on 99,73% metaani. Siiski ei ole see hea kütteväärtuse poolest võrreldes teiste tootjatega. Alaska LNG kütteväärtus on 37,75 MJ/Sm³ (standard kuupmeeter: 20°C juures ja 1 atmosfäärisel rõhul), mis on halvim tulemus tabelis. Seda seetõttu, et teiste maade gaasisegud sisaldavad rohkem ka teisi gaase, millede kütteväärtus on kõrgem kui metaani oma. Parim tulemus kütteväärtuse poolest on saadud Liibüa LNG-l, mis on 44,02 MJ/Sm³. See gaaside segu sisaldab metaani vaid 81,57%, etaani on segus 13,38% ja propaani 3,67%. Samuti on tootel ka kõrgeim *Wobbe* indeks [17]. Niinimetatud ranget ülemaailmset LNG kvaliteedinäitajate normi pole – kvaliteet peab vastama sellele, mis otstarbeks ja kuidas gaasi tarvitatakse. Kui aga tahetakse LNG-d taasgaasistada ühtsesse maagaasivõrku, siis on igal riigil selle kohta omad vastavad kriteeriumid.

Alljärgnevas tabelis 1.7 on toodud välja Eestis kehtivad võrgugaasi kvaliteedinõuded Elering Gaas AS juhatuse otsusest nr 46 – 7 [20]. Seega peab Eesti võrgugaasis olema vähemalt 90% metaani ning ülejäänud komponentide arv on üsnagi piiratud.

Tabel 1.7 – Võrgugaasi kvaliteedinõuded [20]

Nr	Näitajad	Ühik	Piirmäär
1	Metaani sisaldus - CH ₄	% mol	> 90
2	Lämmastiku sisaldus - N ₂	% mol	<3
3	Süsihappegaasi sisaldus - CO ₂	% mol	< 2,5
4	Hapniku sisaldus - O ₂	% mol	< 0,02
5	Vesiniku sisaldus - H ₂	% mol	< 0,1
6	Üldise väavli sisaldus ilma odorandita - S	g/m ³	S 0,03
7	Väavelvesiniku ja karbonaatse väavli sisaldus H ₂ S + COS	g/m ³	S 0,007
8	Merkaptaanväavli sisaldus ilma odorandita RSH	g/m ³	< 0,016
9	Saasteainete osakeste sisaldus	g/m ³	< 0,001
10	Vee ja süsivesinike vedelate osakeste sisaldus	g/m ³	Mitte lubatav
11	Metaanarv		> 65
12	Suhteline tihedus - d	-	0.55-0,75
13	Süsivesinike kastepunkti temperatuur - HC DP	°C	< -2 (at 0.1 —7 MPa)
14	Vee kastepunkti temperatuur - H ₂ O DP	°C	< -8 (at 7 MPa)

1.4. Transport ja hoiustamine

Maagaasi veeldamise tehnoloogia teeb võimalikuks LNG transportimise spetsiaalsetes mahutites suurte vahemaade taha ning LNG kaod ei ületa ka pikkadel reisidel 1-2% [10].

LNG merevedudeks kasutatakse spetsiaalsete krüogeensete mahutitega varustatud LNG-laevu. Hetkel suurimad merevedudeks kasutatavad veeldatud maagaasi laevad kuuluvad Katari riiklikele gaasikompaniidele. Need on Q-max tüüpi laevad, mis mahutavad kuni 266 000 m³. Paljud laevad on märksa väiksemad ja nendel veetavad LNG-mahud ulatuvad kuni 15 000 kuupmeetrini [11].

Kõige väiksemate LNG-laevade mahutavus ulatub vaid mõnesaja kuupmeetrini. Selliseid laevu kasutatakse punkerduslaevadena, see tähendab, et nende ülesanne on punkerdada (kütusega tankida) laevu, mis kasutavad LNG-d kütusena [11].

Maismaal veetakse LNG-d raudtee- või autotsisternidega. Eesti teedel, vastavalt kehtivale seadusandlusele, on LNG transport kui ADR (*European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road – ADR*) vedu. See on ohtlike veoste rahvusvaheline autoveo Euroopa kokkulepe, mis võeti vastu juba 1957. aastal ja millega Eesti ühines 1996. aastal. Nõuded on samad nagu teiste tuleohtlike ainete veole (vedelkütused, propaan-butaan, jne). See seab transpordis teatud piirangud saartele, sest kasutada saab ainult ADR vedude praame. LNG maanteeveod vastavad ohtlike veoste rahvusvahelise autoveo Euroopa kokkuleppele. Tuginedes Eesti seadustele ei ole võimalik Eesti teedel sõita üle 20-tonnise koormaga (normatiividega lubatud maksimaalne teljekoormus on 10 tonni ning see vastab 53-56m³ veokile). Tsisternveoki tühjendamise aeg on kogust arvestades suhteliselt väike, keskmiselt 0,5-1 tundi, ning sõltuvalt tarnitavast kogusest saab veokit tühjendada ka osaliselt ja mahuti täitmise ajal on gaasi tarbimine lubatud. Kuna autodel kasutatavate mahutite näol on tegemist vaakum-isoleeritud mahutitega, ei sea see erilisi piiranguid läbitavatele vahemaadele, arvestama peab vaid majandusliku efektiga [13].

Jetgas OÜ poolt saadud info alusel on neile LNG-d transportivatel autodel mahuti maksimaalseks rõhupiiriks 7 bar (700kPa), millal rakendub ülerõhuklapp. Ise impordivad nad LNG-d valdavalt Venemaalt Kingisepast ja Peterhofist.

Eestisse on plaanitud ehitada samuti LNG terminal. Planeerimise käigus hõlmab terminali projekt LNG ookeanilaeva vastuvõtmise- ja mahalaadimisvõimekuse loomist, 160 000 kuupmeetri suuruse LNG hoidla rajamist, seadmeid LNG taasgaasistamiseks ja

edastamiseks Balticconnector'i kaudu nii Soome kui Eesti ja Läti gaasivõrkude suunal ning LNG pealelaadimisvõimekuse loomist väiksemate laevade, veoautode kui ka raudteevagunite jaoks [21].

Planeeritud terminali projekti arendab Alexela Group ning see peaks kerkima Paldiskisse. Paraku on hetkel projekt pidurdunud, kuna Leedus töötab LNG ujuv-terminal, mis suudaks katta ligi 90% kogu Balti riikide gaasivajadusest. Seetõttu ei andnud Euroopa Liit Eesti terminali jaoks praegu toetust [22]. Seega peab Eesti lähiajal importima LNG-d sisse enamasti ikkagi Venemaalt.

LNG hoiustamiseks ja vaheladustamiseks kasutatakse spetsiaalseid krüogeenseid hoiumahuteid, mis koosnevad tavapäraselt kahest teineteise sees asuvast mahutist. Sisemine (esmane) LNG-hoiumahuti valmistatakse suure niklisisaldusega terasesulamist, mis talub LNG ülimaldalaid temperatuure ega muutu rabedaks. Välimise hoiumahuti ülesanne on kaitsta sisemist mahutit vigastuste eest ning vältida LNG lekkeid, juhaks kui sisemine mahuti peaks mingil põhjusel siiski purunema [11].

Tavaliselt valmistatakse suuremate LNG hoiustamismahtude puhul betoonist väline mahuti, mis suurtes importterminalides võib ulatuda sadade tuhandete kuupmeetriteni. Väiksemates nn satelliitterminalides, kus käideldakse märksa väiksemaid LNG-mahte, kasutatakse enamasti metallist väliskestaga LNG-hoiumahuteid, mis võivad olla nii horisontaalse kui ka vertikaalse paigutusega [11].

Väikesemahulistel mahutitel on enamasti roostevaba sisemus ning kas ka roostevabast või mustast metallist väliskest. Selleks, et vältida LNG ülessoojenemist väliskeskkonna temperatuuri mõjul ning sellega kaasnevat iseeneslikku aurustumist (*boil-off gas – BOG*), isoleeritakse kahe mahuti vaheline ruum väga halva soojusjuhtivusega isolatsioonimaterjalidega [11].

Terasest mahutite puhul kasutatakse isolatsioonimaterjalina tihti perliiti ning mahutite kahe kesta vahelisse alasse tekitatakse vaakum. Sõltuvalt ümbritseva keskkonna temperatuuridest, kasutatava LNG-mahuti tüübist ning soojusisolatsiooni kvaliteedist võib LNG iseenesliku aurustumise määra alandada kuni 0,1%-ni mahutis hoitava LNG mahust päevas. Metallist kestaga LNG-mahutite puhul peetakse 0,2%-list aurustumise määra väga heaks tulemuseks. Iseeneslikult aurustunud LNG kas tarbitakse (maagaasina) või kogutakse kokku, veeldatakse uuesti ning suunatakse LNG-mahutisse tagasi [11]. Eestisse imporditud LNG-d hoitakse hetkel

imporditava produkti omaduste tõttu mahutites enamasti ~9 bar (900 kPa) juures ning tänu rõhule suudetakse hoida LNG veeldatud kujul veel ka -135°C juures. Eestis hetkel kasutatavate mahutite ülerõhuklapid on seatud 11 bar (1100 kPa) peale.

1.5. Gaasistamine

Selleks et LNG-d saaks tarbida, tuleb ta viia vedelast olekust tagasi gaasilisse – andes protsessi soojusenergiat. Väiksemad LNG-kogused aurustatakse tavapäraselt välisõhaurustitega, kus LNG juhitakse torustikku, mille välisseina pindala on maksimaalse soojusvahetuse saavutamiseks varustatud lamellidega. Kuna tarbijani peab gaas jõudma vähemalt +0°C juures, siis kasutatakse talveperioodil ka vajadusel elektrikütet või väikesemahulist gaasipõletit gaasi ette soojendamiseks.

Suuremate LNG-mahtude taasgaasistamiseks kasutatakse sukeldatavaid põletusaurusteid (*submerged combustion vaporizer – SCV*) või soojusvaheteid, kus soojusagensiks on näiteks merevesi (*open rack vaporiser – ORV*). Saadud maagaasi rõhk langetatakse (või tõstetakse) gaasitorustiku jaoks sobilikule kõrgusele ning seejärel suunatakse gaas tarbijale [11].

Antud protsessis kerkib esile selle töö mõte ehk jääkjahutusenergia, mis antud hetkel antakse üle lihtsalt ümbritsevale keskkonnale ning raisatakse ära kogu potentsiaalne kättesaadav energia, mis maagaasi faasimuutuseks sellele anti.

Näiteid katlamajades ja kodumajapidamises kasutatavatest LNG süsteemidest leidub sellistes riikides nagu näiteks Venemaa, Poola, Rootsi, samuti ka Eesti [13]. 2017. aasta seisuga on Eestis paigaldatud juba mitmeid regasifitseerimisjaamu.

Esimene jaam käivitati 2014. aasta juunis Saaremaal, Kuressaares (joonis 1.3). Selle külge on liitunud nii piimakombinaat kui ka lihatööstus. Tööstuste gaasi tarbimised on jaotunud aasta lõikes vastavalt ~700 tonni aastas ja ~500 tonni aastas. Kokku on jaama tarbimine hetkel vägagi stabiilne ning jääb aasta lõikes ~1200 tonni juurde. Jaama mahuteid täidetakse kuus keskmiselt 5 korda. Mahuti Saaremaal on 80 m³, mida on võimalik täita maksimaalselt 95% ulatuses, sest mingi osa peab säilima gaasilisel faasil, selle gaasi osa abil hoitakse mahutites ka rõhk ning väljuvad kogused stabiilsena. Lisas 2 on näha mahuti skemaatiline torustik, kus kajastub ka paagi gaasi survepadja hoidmise ahel. Jetgas OÜ poolt kasutatavate mahutite tootja firma on *Chart Industries* nende tootevalik on väga lai. Paides ja Saaremaal on kasutatud SG430HF tüüpi mahutit. Mahuti tühikaal on veidi üle 1000 kg ning antud mahutid sobivad erisuguste gaaside hoiustamiseks.

Joonisel 1.3 tagaplaanil asetsevad nii-öelda tornid (2 tk) on soojusvahetid, mis gaasistavad LNG-d. Vajaminev soojusenergia saadakse välisõhust ning jahutusenergia antakse üle ainult väliskeskkonnale. See tähendab, et jahutusenergia läheb hetkel ehitatud jaamade puhul kaotsi.



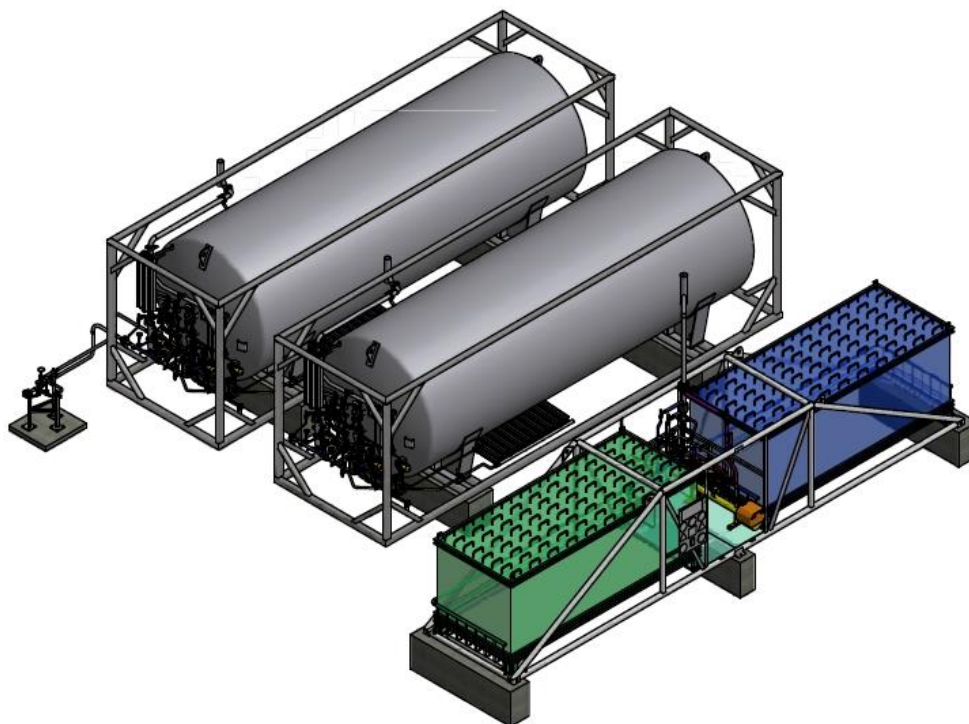
Joonis 1.3 – Saaremaa LNG gasifitseerimise jaam [23]

Paides pandi LNG seadmed paika 2015. aasta aprillis [23]. Tarbija seal on pagaritööstus ning tarbimine on ööpäevade ning aasta lõikes ühtlane.

Joonisel 1.4 ja 1.5 kajastatud horisontaalsed mahutid on head sellepolest, et neid ümbritseb raam ning neid on lihtne transportida konteiner tüüpi autotranspordiga. Seega on võimalik LNG aurustusjaam suhteliselt kiirelt ja lihtsalt transportida ja käima panna teises asukohas. Miinuseks vertikaalse mahuti juures nähakse teoreetiliselt seda, et LNG vedeliku aurustuspind on suurem ning seeläbi on kiirem ka iseeneslik aurustumisprotsess. Reaalses olukorras, kus jaam on töös ning toimub pidev tarbimine ei ole sellest suurt probleemi, kuna kogu mahuti on isoleeritud.



Joonis 1.4 – Paines olev gasifitseerimisjaam horisontaalsete mahutitega [23]



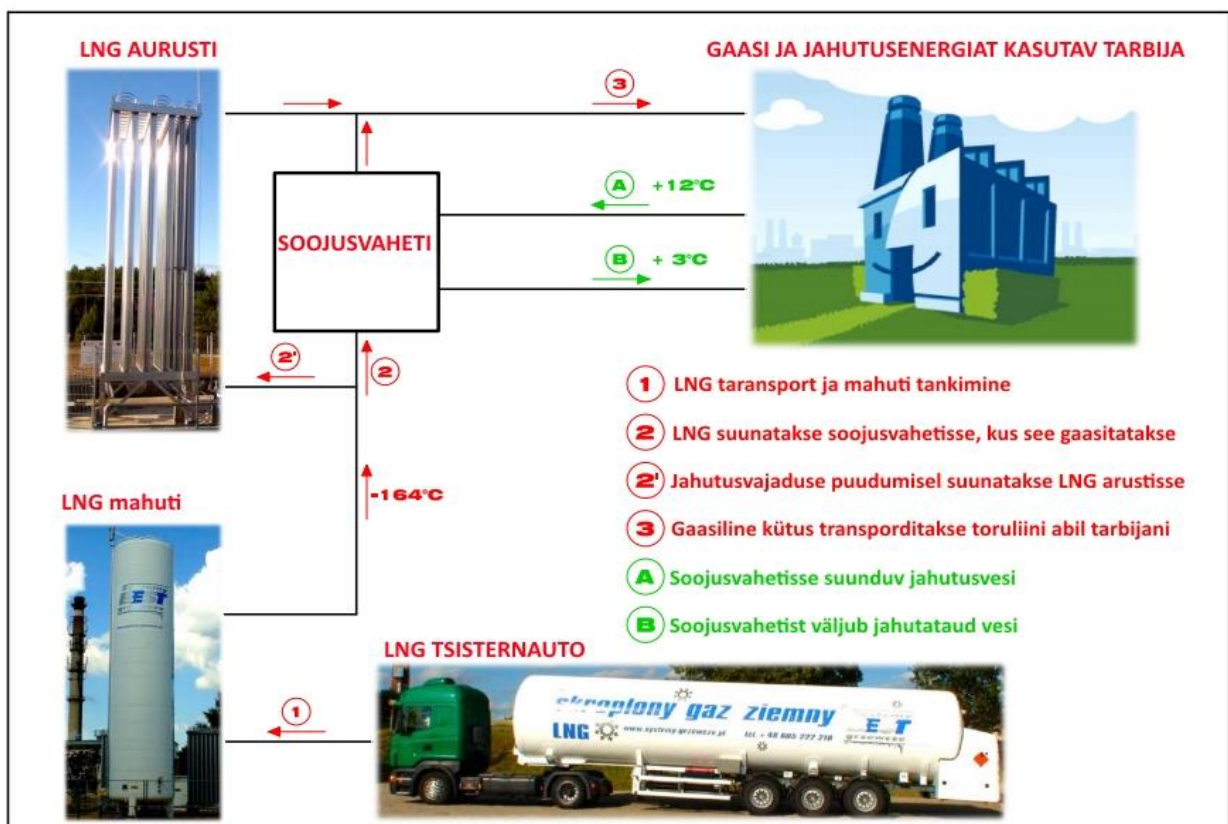
Joonis 1.5 – Horisontaalsete mahutite ja gaasistite skeem [24]

Taasgaasistusjaamad on ehitatud ettevõttel ka Mäos ning Võrus. Mäos alustas LNG jaam tööd 2015. aasta mais. 2015. aasta septembris alustas tööd LNG seade Võru linnas. Arendamisjärgus on jaamu veel üle Eesti (näiteks Haapsalus) ning perspektiivi on näha ka üle Baltikumi [25].

2. Jääkjahutusenergia kasutamise teoreetilised alused

Antud peatükis vaadeldakse LNG jääkjahutusenergia kasutamise seisukohalt olulisemaid teemasid, milleks on faasisiire ja erisoojus. Selles peatükis on samuti käsitletakse teoreetilisel tasemel ka jahutusprotsesse ja agregate, mis on vajalikud protsessi toimimiseks. Lisaks hinnatakse LNG jääenergia kasutamise otstarbekust võrreldes kompressorjahutitega (levinuum jahutuse tootmise viis).

Alljärgnev joonis annab lihtsustatult edasi jääkjahutusenergia kasutamise põhimõttelise loogika ning juhatab sisse järgnevat peatükides tehtavate arvutuste ning teooriate mõtte. Joonis 2.1 põhineb Poola firma BEST Company materjalidel, kus nad on loonud väidetava prototüüpprojekti, kus kasutavad sama ideega LNG jahutusenergiat tööstusprotsessis ära. Eesti lähiriikides, samuti ka Baltikumis ei ole veel antud tehnoloogiat kasutatud ning terves maailmas on see veel uus suund. Joonisel kajastatud temperatuurid ei ole ainuvõimalikud ning tegu on lihtsustatud põhimõtteskeemiga.



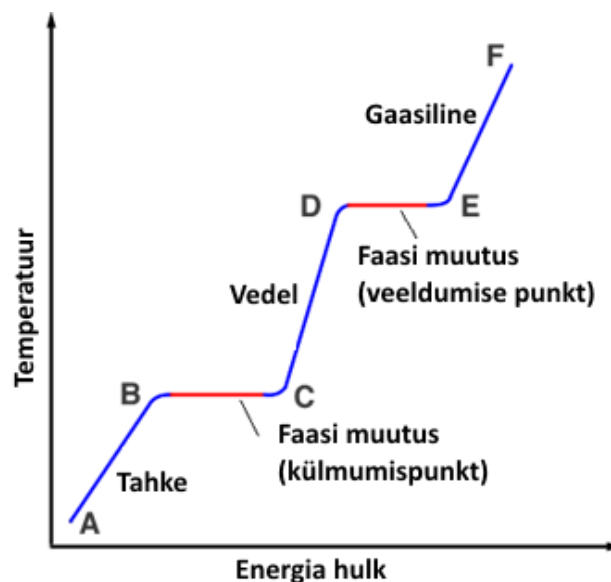
Joonis 2.1- Lihtsustatud skeem jahutusenergia kasutamiseks [26]

2.1. Faasisiirded

Kehad võivad minna soojendamisel või jahutamisel ühest agregaatolekust teise. Seda nimetatakse faasisiirdeks.

Näiteks puhas vesi jäätab 0 °C juures ja gaasistub 100 °C juures ehk muutub veeauruks. Metaanil on vastavad näitajad madalamad, metaan jäätab atmosfäärirõhul -182 °C ning aurustub -162 °C juures. See tähendab, et metaan (LNG põhiline komponent) muutub rõhul 1 atmosfäär (101.325 kPa) vedelikuks temperatuuril -162 °C.

Joonis 2.2 kajastab faasisiirdeks vajalikku energiate hulka ja temperatuuri muutumist. Protsessi viidud energia hulk ei muutu lineaarselt koos temperatuuri muuduga. See tähendab, et aine faasi muutmisel (nt gaasistamine, veeldamine, tahkestumine, sulamine) temperatuur praktiliselt ei tõuse ega alane. Protsessi toimimiseks on vaja energia lisamist või protsessist energia välja viimist [27].



Joonis 2.2 – Temperatuuri ja vajaliku energia seosed faasisiirdeprotsessides [28]

Metaani keemispunktil olev aurustumissoojus (inglise keeles *Latent heat of vaporization*) atmosfäärirõhul on 510,83 kJ/kg. See tähendab, et ainuüksi faasi muutumiseks (gaasistamiseks või veeldamiseks) 1 kg metaani kohta keemispunktis kulub või eraldub 510,83 kJ energiat [29].

Aurustumiseks vajalik soojushulk saadakse läbi valemi 2.1.

$$Q = r m \quad (2.1)$$

kus m – on aurustatava vedeliku mass;

r – aurustamistemperatuurile vastav aurustumissoojus.

2.2. Erisoojus ja tihedus

Aine erisoojus on aine temperatuuri muutmiseks ühe kraadi võrra kulunud või vabanenud soojuse hulk (valem 2.2) [27]. LNG taasgaasistamisel vabaneva jahutusenergia hulga arvutamisel on vaja see leida, kui otsitavaks on vabanev energia hulk temperatuuri muutumisel.

$$dQ = m c dt \quad (2.2)$$

kus dQ – sisseantav soojusenergia hulk kJ;

m – ühiku mass kg;

c – erisoojus kJ/kg °C, kJ/kg K;

dt – temperatuuride erinevus K, °C [30].

Valemist (2.2) saab välja teisendada erisoojuse (valem 2.3):

$$c = dQ/m dt \quad (2.3)$$

kus sisendtegurid on samad, mis kajastatud valemis (2.2).

Antud seos ei kehti juhul, kui temperatuuri muutumise vahepeale jääb ka faasi muutus. Sellel juhul on vaja protsessi anda märgatavalt rohkem energiat ning tuleb jälgida ka eelnevas alapeatükis (pt 2.1 Faasisiirded) kirjeldatud suurusi.

Erisoojused jagunevad:

1. Erisoojus püsival mahul (isohooriline erisoojus) C_v saadakse siis, kui termodünaamilise keha maht jääb erisoojuse määramisel konstantseks (valem 2.4).

$$C_v = \delta h / \delta T \quad (2.4)$$

kus δh – entalpia muut;

δT – temperatuuri muut.

Lisaks sellele eristatakse ka järgnevaid erisoojusi:

- mass-erisoojus, mille ühik on C [J/kgK]
- mooli-erisoojus, mille ühik on μC [J/kmolK]
- mahu-erisoojus, mille ühik on C^l [J/m³K]

2. Erisoojus püsival rõhul (isobaariline erisoojus) C_p saadakse siis, kui termodünaamilise keha rõhk jääb erisoojuse määramisel konstantseks. Ühikuks on $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ ehk kJ/kgK (valem 2.5).

$$C_p = \delta h / \delta T \quad (2.5)$$

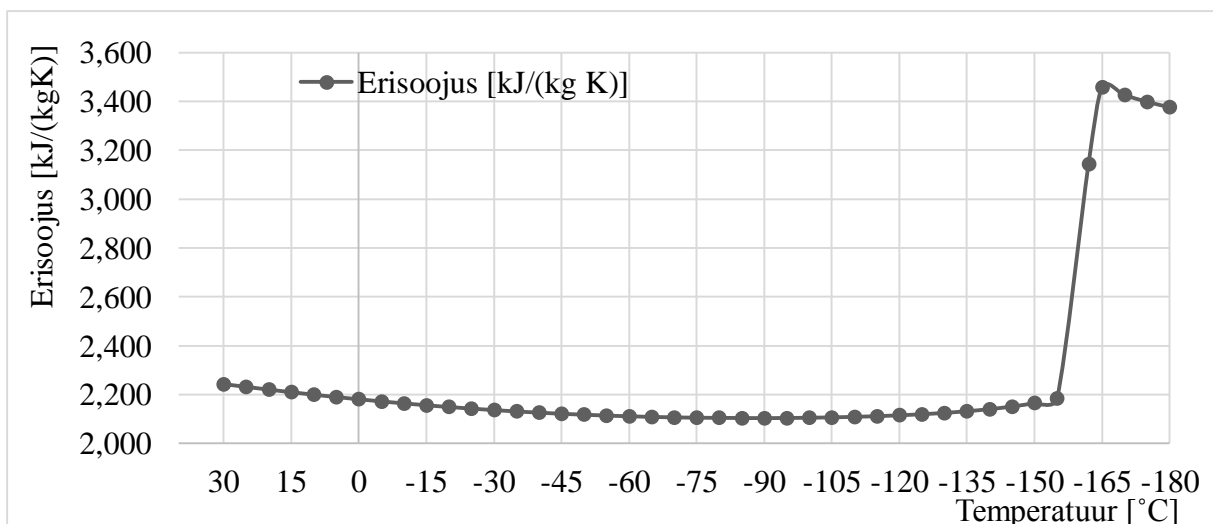
kus δh – entalpia muut;

δT – temperatuuri muut [31].

LNG puhul on tegemist erisoojusega püsival rõhul ehk protsessi käigus toimub mahuline muutus. Kui mahutis temperatuur tõuseb ja rõhk hakkab tõusma, siis väljastatakse liigne rõhk (gaas) läbi ülesurveklapi atmosfääri. Seda juhul, kui ei ole LNG-le vastavalt tarbimist ning tekib oht mahuti vastupidavusele. Seega rõhk püsib mahutis üsna samas vahemikus. LNG-d tarbides soojendatakse see soojusvahetite abil ülesse, mille käigus samuti kasvab maht sadu kordi.

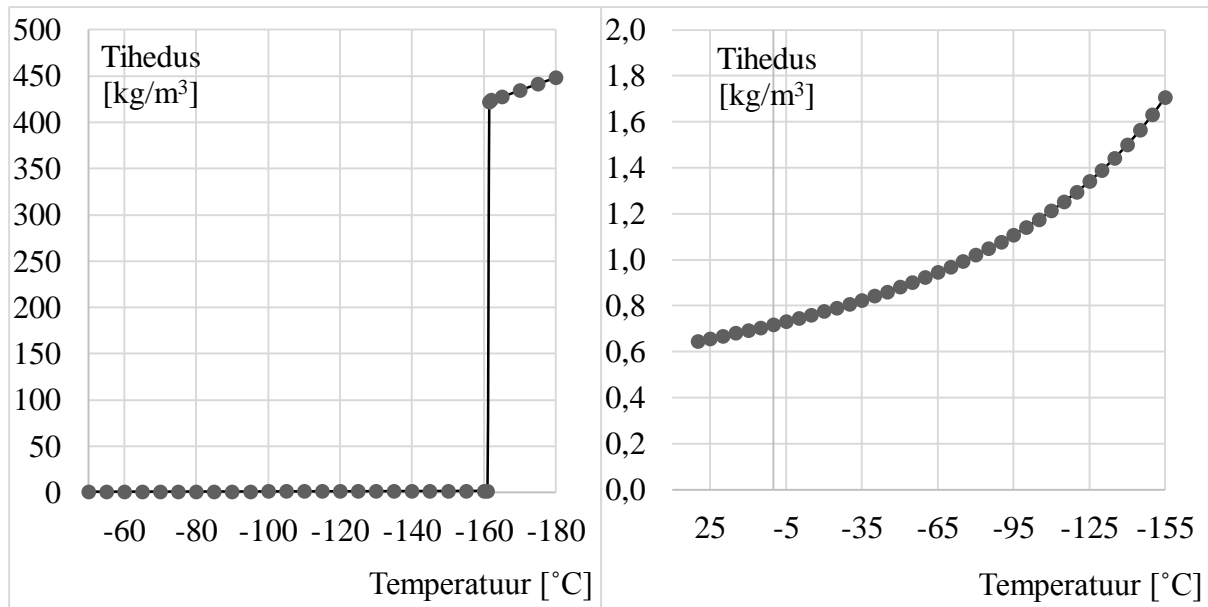
Kuna LNG koostis vastavalt tarnijast muutub mõnevõrra, kuid põhiosa on alati metaan, siis seetõttu on edasised arvutused teostatud metaani andmete põhjal. Tegelikud suurused võivad mõningal määral muutuda vastavalt gaasi koostisele.

Kui jälgida metaani erisoojust temperatuuri muutudes saame tulemi, mis on kajastatud järgmisel joonisel 2.3. On näha, et erisoojus on $+30^\circ\text{C}$ kuni -160°C suhteliselt samal tasemel ning pärast seda muutub järsult. See tähendab, et pärast seda toimus faasi muutus ja gaas muutus vedelikuks. Metaani erisoojus jääb -161°C kuni $+10^\circ\text{C}$ 2,1 ja 2,2 kJ/kgK vahele, siis faasi muutumisel 162°C (atmosfäärirõhul) tõuseb see järsult $\sim 3,5 \text{ kJ/kgK}$ juurde.



Joonis 2.3 – Metaani erisoojuse muutus võrreldes temperatuuri muutumisega rõhul 1 atm (101.325 kPa)

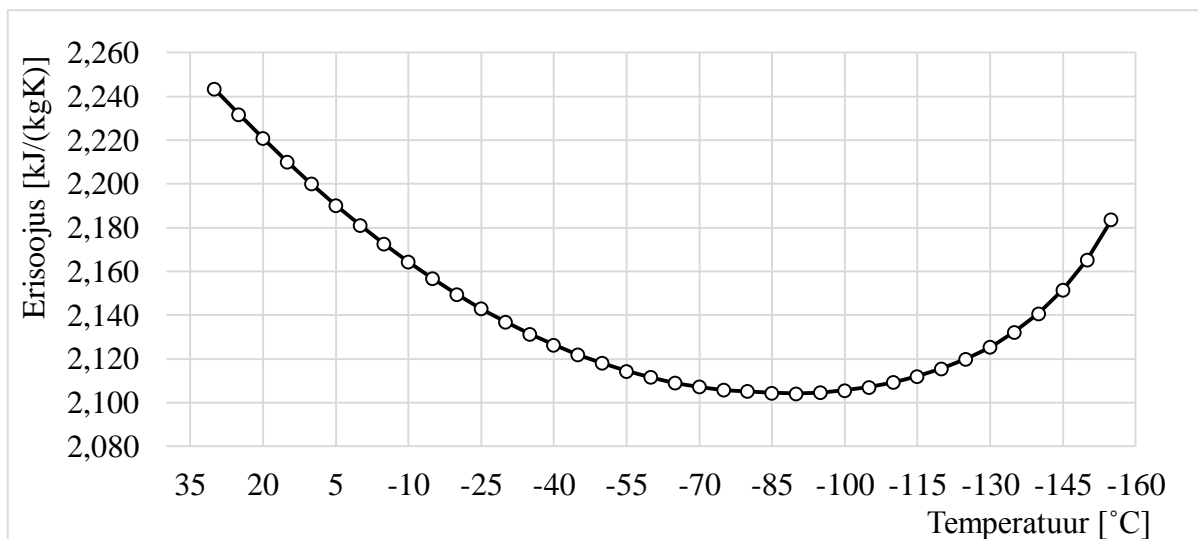
Võrreldes erisoojuse muutumist on otstarbekas jälgida ka metaani tiheduse muutumist vastavalt temperatuuri muutmisele. Joonisel 2.4 on kajastatud tiheduse muutus -180°C kuni $+30^{\circ}\text{C}$. Esmasel vaatlusel on näha, et tihedus muutub järsult -162°C juures, kus muutus ka faas, mis tähendab, et gaas muutub vedelikuks ning aine muutub sadu kordi tihedamaks.



Joonis 2.4 – Metaani tiheduse muutus võrreldes temperatuuri muutumisega rõhul 1 atm (101.325 kPa)

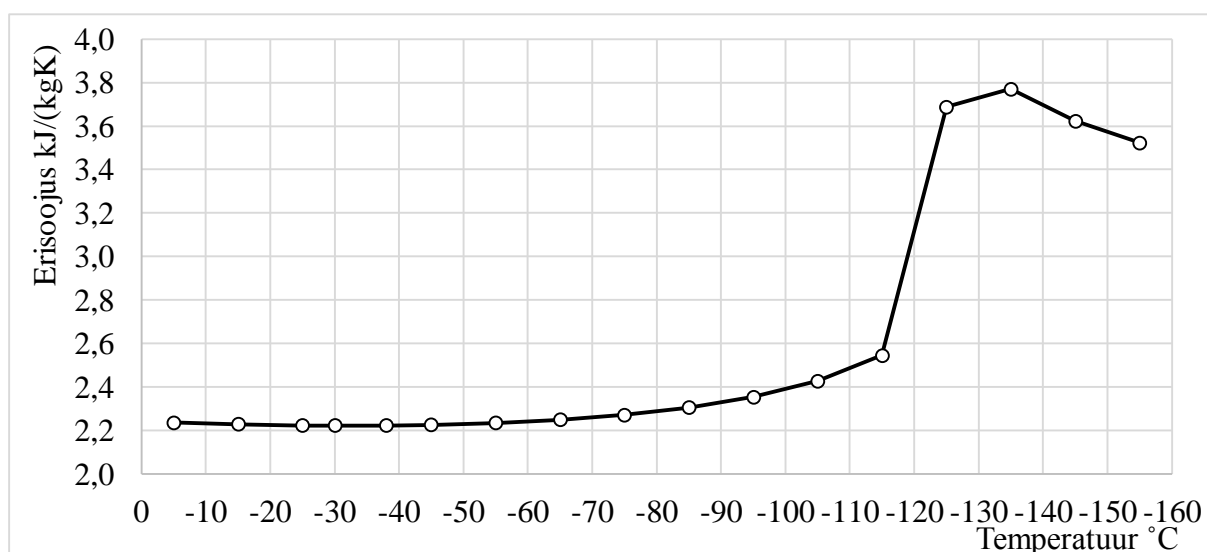
Kui aga jälgida kitsamat spektrit -155°C kuni $+30^{\circ}\text{C}$ (gaasiline olek) rõhul 1 atm (101.325 kPa) siis on näha, et tihedus kasvab pidevalt temperatuuri alanemisega, lihtsalt faasi muutumise ajal on protsess järsk, mil on tihedus $\sim 430 \text{ kg}/\text{m}^3$ kohta ning mõned kraadid kõrgemal (155°C) juures juba $\sim 1,7 \text{ kg}/\text{m}^3$. $+30$ kraadi juures on tihedus $0,65 \text{ kg}/\text{m}^3$ kohta (atmosfäärirõhul).

On teada, et erisoojus muutub temperatuuri muutumisega. Kui jälgida aga erisoojuse suurust temperatuuril -155°C kuni $+20^{\circ}\text{C}$ (atmosfäärirõhul), siis selgub, et väiksem on see -90°C juures ($2,104 \text{ kJ}/\text{kgK}$) ning suurim $+20^{\circ}\text{C}$ juures, kus on vastav väärtus $2,221 \text{ kJ}/\text{kgK}$ (joonis 2.5). Seega nii laia temperatuuri diapasoni juures jääb erisoojuse väärtuse muutus üsnagi väikeseks. Töös edasiste arvutuste lihtsustamiseks (punktis 2.5 Jahutusenergia potentsiaal energia ja massiühiku kohta) leitakse erisoojuse aritmeetiline keskmine temperatuur vahemikust -161°C kuni 10°C , sest see on realselt kasutatav temperatuuride vahemik protsessides. Vastav väärtus oleks $2,122 \text{ kJ}/\text{kgK}$ [32]. Täpsemad erisoojuse kui ka tiheduse muutumise näitajad vastavalt temperatuurile (rõhul 1 atmosfäär) on kajastatud lisa 3. [33].



Joonis 2.5 - Metaani erisoojus ja tihedus sõltuvalt temperatuurist rõhul 1 atm (101.325 kPa)

Skandinaavias ja enamikus Euroopas hoitakse LNG-d atmosfääri rõhu lähedal. Kuna protsessides võib olla LNG ka kõrgema rõhu all, nagu hetkel Eestis olevates gaasistusjaamades, kus LNG-d hoitakse rõhul ~ 9 bar (900 kPa) ja temperatuuril -135°C, siis tuginetakse arvutuste koostamisel vastavalt reaalsele tulemile. Antud näitajate juures on LNG erisoojus 3,770 kJ/kg*K ja tihedus 380,643 kg/m³. Joonisel 2.6 on kajastatakse metaani erisoojuse muutumine rõhul 9 bar (900 kPa) ja temperatuuril -5°C kuni -155°C. Selle abil on aru saada, et antud rõhul toimub faasi muutus ~ -126°C juures. Vastavate andmete alusel on koostatud ka arvutused alapeatükkides 3.1 ja 3.2.



Joonis 2.6 - Metaani erisoojus 9 bar (900 kPa) juures

2.3. Jahutusprotsessid

Jahutusprotsessi toimimine on seotud ja võimalik tänu erinevatele alamprotsessidele, seadmetele ja kasutatud külmakandjatele (külmutusagensidele).

Esmalt peab jahutuse tootmise iseloomustamiseks lähtuma sellest, mille jaoks meil on jahutust vaja ning mis kogustes ja temperatuurivahemikes. Kui rääkida üldiselt jahutamisest, siis seda võib liigitada esmalt külmakandja järgi. Peamised külmakandja liigid on:

- õhk – kui näiteks ruumides on tegu õhkkülmakandjatega, siis transportitakse jahe õhk ventilatsiooniga sisse ja soe õhk eemaldatakse väljatõmbesüsteemiga;
- vedelik – külmakandja korral paiknevad näiteks ruumis vedelik-õhk soojusvahetid (konvektorpuhurid, jahutuspalgid), kui soovitakse energiat üle anda protsessile, siis valitakse selleks vastavalt sobilikud soojusvahetid;
- külmutusagensid - freoonid – külmakandja jahutussüsteemid on analoogsed kompressorkülmajaamadega. Kui soovitakse ruumi jahutada, siis paikneb jahutatavas keskkonnas õhk-freoon tüüpi soojusvaheti (aurusti), kus freooni aurustumiseks vajalik soojus võetakse ruumiõhult [34].

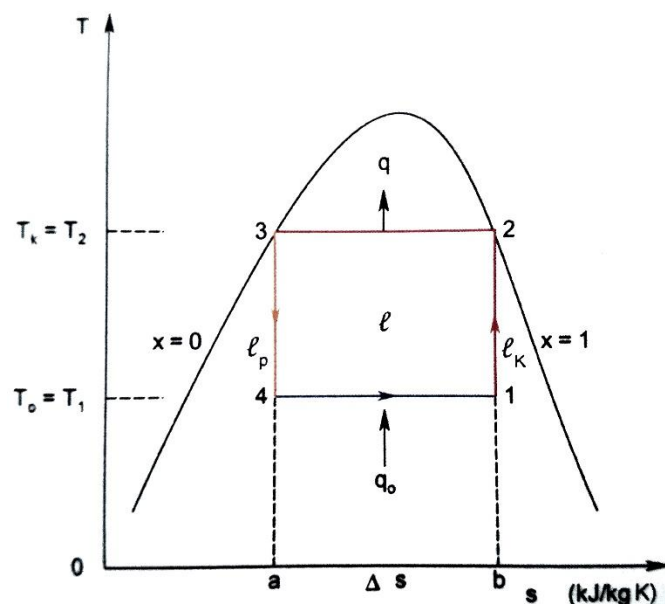
Külmutusagensidele esitatavad põhinõuded, mis kehtivad soojuspumpadele ning samuti ka külmutusseadmetele, on:

- madal külmumistemperatuur, selle abil välistatakse aine tahkumine ning võimalik seadme rikkimine;
- suur aurustumissoojus, see tagab väiksema läbivoolu sama võimsusega seadmes;
- kõrge kriitiline temperatuur, läbi selle on soojuspump võimeline tarbijat vajadusel varustama kõrgete temperatuuridega (jahutusseadme puhul vastupidises olukorras, madala temperatuuriga);
- madal kondenseerumisrõhk kondenseerumistemperatuuri suhtes võimaldab vähendada koormust seadme elementidele;
- agens ei tohi juhtida elektrit, sest sõltuvalt seadmest jahutab ka aur mootorit;
- agensi aurustumisrõhk peab olema kõrgem atmosfäärirõhust, selle abil välditakse välisõhu tungimist seadmesse;
- hea soojusjuhtivustegur, selle abil on võimalik vähendada soojusvahetuspindasid;
- madal viskoossus, see vähendab takistust voolamisel hüdraulilistes protsessides;

- väike külmutusagensi ja vee lahustuvusvõime, et vesi ei jäätuks protsessides;
- külmutusagensi ja õli lahustuvus määrimisomaduste tarbeks;
- peab vastama tervisenõuetele ja keskkonnanõuetele;
- ei tohi põhjustada korrosiooni ning peab ajas säilitama oma omadusi;
- tuleohutus [35].

Soojuse ülekandmine tehiskülma tootmiseks kompressormasina abil toimub Carnot' pöördringprotsessi tingimustel, kus selle protsessi täielikuks teostamiseks vajatakse minimaalset kogust energiat. Seega Carnot' ringprotsess kõikidest võimalikest teadaolevatest ringprotsessidest on kõige efektiivsem. Vaadeldav ringprotsess töötati välja 1824 aastal prantsuse õpetlase ja inseneri N. L. S. Carnot' (1796-1836) poolt. Samal aastal formuleeris tema ka termodünaamika II seaduse [36].

Seda protsessi kujutatakse T-s diagrammil (joonis 2.7), kus kogu pöördringprotsess toimub terves ulatuses niiske auru alas ja koosneb neljast eraldi protsessist: kahest isotermist (protsessi käigus temperatuur ei muutu) 2-3, 4-1 ning kahest isoentroobist 1-2 ja 3-4 (puudub soojusvahetus ümbritseva keskkonnaga) [36].



Joonis 2.7 – Termiliselt tagastatav Carnot' pöördringprotsess [36]

Carnot' ringprotsessi alamprotsessid on kirjeldatud allpool:

- Isotermises protsessis 4-1, mis kulgeb töökeha püsitemperatuuril (T_1 on konstantne), võetakse jahutatavalt objektilt soojust q_0 .

- Isoentroopses protsessis 1-2, mis kulgeb $s=\text{const}$ joont mööda, toimub keemisel tekkinud külmutusagensi auru kokkusurumine ehk komprimeerimine. Selleks kulutatud töö tulemusena tõuseb külmutusagensi temperatuur T_1 kuni T_2 .
- Isotermises protsessis 2-3, mis kulgeb püsitemperatuuril ($T_2 = \text{konstantne}$), kandub soojus kokkusurutud külmutusagensilt üle ümbritsevale keskkonnale. Selle protsessi vältel külmutusagens kondenseerub.
- Isoentroopses protsessis 3-4 toimub külmutusagensi paisumine, millega kaasneva paisumistöö (l_p) tulemusena langeb agensi temperatuur T_2 -lt temperatuur T_1 -le.

Ideaalne tagastatav Carnot' pöördringprotsess on selline, mille täielikuks teostamiseks pole vaja kulutada välist tööd. Reaalne jahutusseade ei saa aga funktsioneerida Carnot' tagastatava ideaalse pöördringprotsessi põhimõttel. Tegelikult ei piisa töökeha paisumisel saadud tööst l_p tööks, mis on vaja teha taaskomprimeerimiseks. Lisaks on reaalselt toimiva pöördringprotsessi korral külmutusagensi temperatuur T_0 alati madalam jahutatava objekti temperatuurist T_1 . Samuti on külmutusagensi kondenseerumistemperatuur T_k alati kõrgem ümbritseva keskkonna temperatuurist T_2 [36].

Jahutuse tootmise efektiivsust iseloomustatakse jahutusteguriga, mis näitab kui palju kulub ajahetkel primaarenergiat (nt elekter, soojus) ühe ühikuna jahutusenergia tootmiseks. Jahutustegurit tähistatakse tähisega COP, mis tuleneb inglise keelsest väljendist *coefficient of performance* ja ta avaldub valemiga (2.6):

$$COP \text{ jahutus} = \varphi \text{ kasulik} / \varphi \text{ primaar} \quad (2.6)$$

kus $\varphi \text{ kasulik}$ – ajahetkel toodetud energia, saadud jahutusenergia kogus (kW, kJ/s, kWh/h);
 $\varphi \text{ primaar}$ – sel ajahetkel jahutuse tootmiseks kulunud primaarenergiat, näiteks elekter (kW, kJ/s, kWh/h) [34].

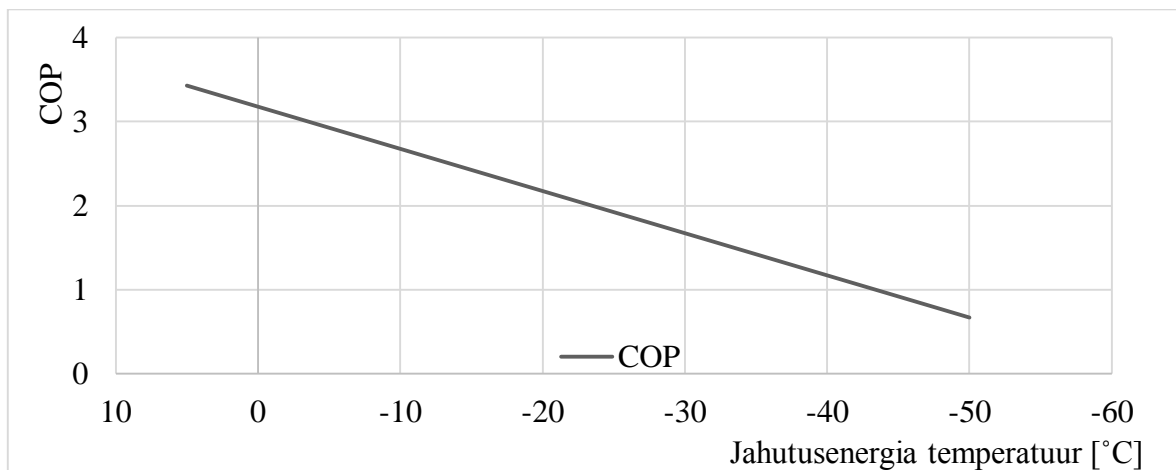
See tähendab, et kui kompressorjahutusseadme COP on 3, siis 3 kWh jahutusenergia tootmiseks kulutatakse vaid 1 kWh elektrienergiat. Ülejäänud võetakse kas ümbritsevast keskkonnast või mõnelt muult soojuskandjalt.

Kompressorjahutusseadme jahutustegur (COP) väiksemate temperatuurierinevuste korral on üldjuhul suurusjärgus 3...5 [34]. See sõltub temperatuuride vahemikest, mille vahel ta töötama peab. Näiteks kui jahutusseade peab tootma ja üle kandma süsteemile -50°C ainet $+40^\circ\text{C}$ keskkonnast, siis see tegur langeb väga väikeseks. Just selles olukorras tuleb esile LNG

gaasistamisel saadav jahutusenergia, sest sealt saadav võimalik temperatuur saab olla vägagi madal.

Alljärgneval joonisel 2.8 kajastatakse üldiste näitajate baasil ligikaudne kompressorjahutusprotsessi efektiivsuse langus sõltuvalt temperatuurist ehk kui palju muutub COP tegur (kondenseerumine temperatuuril $+40^{\circ}\text{C}$). Andmed on tuletatud reaalselt kasutusel olevate protsesside näitajate baasilt. Igal konkreetsel juhul muutuvad suurused sõltuvalt kompressorist, süsteemi ülesehitusest ning mastaapidest, samuti ka eri külmutusagensidest ja kondenseerumistemperatuuridest.

Seega elektrikulu jahutusenergia tootmiseks temperatuuriga 0°C on umbes kolm korda väiksem kui temperatuuriga -40°C , ehk seade tarbib kolm korda rohkem elektrit.



Joonis 2.8 – Kompressormasina efektiivsusteguri muutus sõltuvalt väljundi jahutustemperatuurist (kondenseerumistemperatuur 40°C)

2.4. Soojusvahetid

Siin punktis kirjeldatakse teoreetiliselt LNG jahutusenergia kasutamiseks olulisi soojusvahetuses toimuvaid protsesse, soojusvahetite põhimõttelisi erinevusi ning mõnda näidet soojusvahetitest. Süvitsi soojusvahetite arvutustesse ning disainimisse antud töö raames ei minda, kuna iga tarbija juurde on vajalik projekteerida just neile sobilik süsteem ning soojusvahetite variante on palju. Sinna faasi jõudes tuleb konsulteerida soojusvaheteid müüvate firmadega ning parameetrite alusel välja valida täpne vajalik toode.

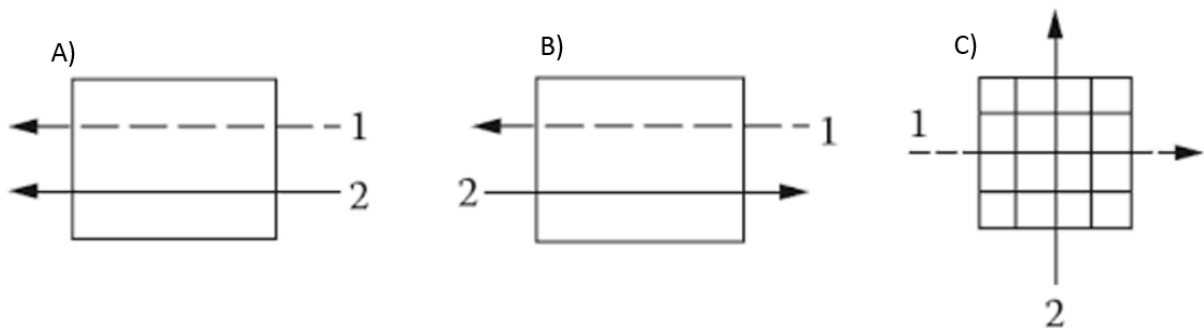
LNG taasgaasistamiseks kasutatakse hetkel vabajahutust keskkonnale ehk soojendamiseks kasutatakse suure soojusvahetuspinnaga soojusvahetit, mille abil toimub veeldatud maagaasi faasi muutus.

Kui soovida ära kasutada LNG-st saadavat jahutusenergiat, siis peab selle energia läbi soojusvaheti nii-öelda kinni püüdma. Seetõttu ongi antud alapeatükk jahutusenergia ülekandmise seisukohalt oluline.

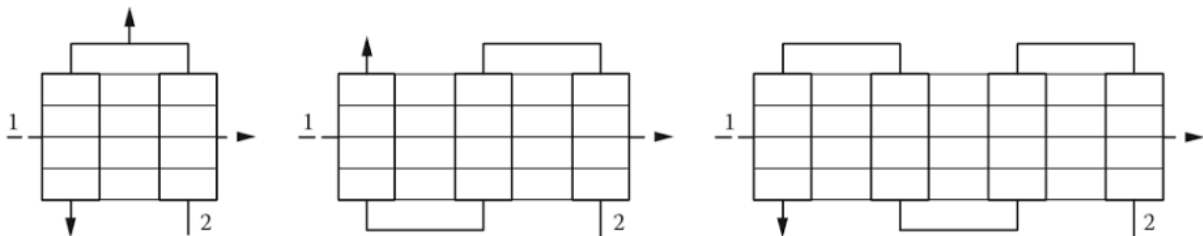
Soojusvaheti valimiseks ja välja arutamiseks tuleb esmalt välja selgitada kasutatavad soojuskandjad. Soojuskandjad on kehad, mis annavad soojust ära või võtavad seda vastu. Soojuse ja massilevi protsessides võib esineda kaks või rohkem soojuskandjat. Soojuskandjad on väga mitmesugused gaasilised, vedelad ja tahked kehad. Nendeks on: veeaur, vesi, suitsugaasid, õlid, soolade lahused ja vedelike segud, sulametallid, keraamilised ja metallist kuulid jne.

Külmutites ja soojuspumpades rakendatakse madalatemperatuurilisi soojuskandjaid. Kuna ained ning nende olekuid, mille abil soojusenergiat üle kantakse, on erinevaid, siis soojusvaheteid jaotatakse soojuskandjate järgi: gaas-gaas-; aur-gaas-; aur-aur-; gaas-vedelik; aur-vedelik-; vedelik-vedelik- jt soojusvahetiteks [37].

Enamikke soojusvaheteid saab klassifitseerida soojuskandjate vooluskeemi alusel päri- ja vastuvoolu-, ristivoolu- ning mitmekordse päri- ja vastuvoolu ja ristivooluga soojusvahetiteks. Nende põhimõtteskeemid on kajutatud alljärgnevatel joonistel 2.9 ja 2.10.



Joonis 2.9 – a). Päri- ja vastuvoolu soojusvaheti b). Vastuvoolu soojusvaheti c). Ristivoolu soojusvaheti [38]



Joonis 2.10 – Mitmekordsete käikudega ristivoolu soojusvahetid [38]

Skeemide valikul on üheks põhiliseks võrdluse aluseks küttepinna suhteline suurus, mis tagab suurima temperatuurimuutusega soojuskandja vajaliku temperatuurimuutuse etteantud sisenemistemperatuuride vahemikus (valem 2.7).

$$T_1 - T_2 = \Delta T_{max} \quad (2.7)$$

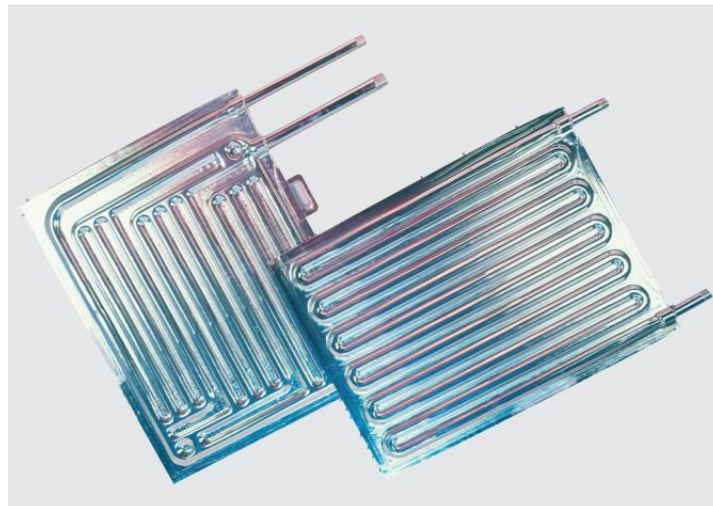
kus T_1 – soojusvahetisse siseneva esimese soojuskandja temperatuur;

T_2 – soojusvahetisse siseneva teise soojuskandja temperatuur;

ΔT_{max} - vajalik temperatuurimuutus [37].

Soojusvaheteid toodavad paljud ettevõtted, kes on disaininud erinevatest materjalidest, pindadest ning eri kujudega ja tehnoloogial töötavaid seadmeid. Täpse jaama või lahenduse juurde sobivate seadmete valik tehakse individuaalselt. Ning sõltuvalt tootjast on lahendusi ning variante mitmeid.

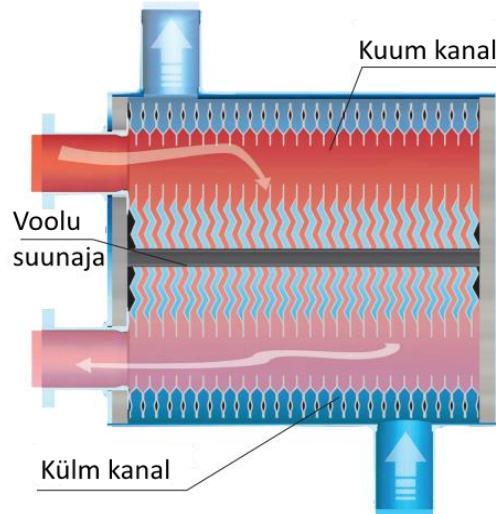
Alljärgnevalt (joonis 2.11) on kujutatud tootja *Tranter* tooteseeriasse - *Platecoil* kuuluvad soojusvahetid. Need on omadustelt lihtsad ning on saada laias võimsusvahemikus. Joonisel on näha vastavalt kolme- ja ühetsoonilist soojusülekanne plaate. Sobilikud on soojusülekandeks antud soojusvahetite puhul nii vedelikud, kahefaasilised olekuparameetritega ained kui ka gaasid. Tootekataloogis on välja toodud soojusvahetid, mille energiakandjaks sobivad nii amoniaak, freoonid, glükool, vesi, madala- ja kõrgerõhuline aur, õlid kui ka emulsioonid [39].



Joonis 2.11 – Platecoil soojusvahetid [39]

Järgnevalt joonisel 2.12 on näha *Tranter* tootja soojusvaheti – *Supermax* plaat-kest seeriast. Tootja lubab tooteid kasutada laias temperatuuri diapasonis, samuti erinevate ainete ning

erinevate mahtude juures. Põhimõttelt sarnaseid tooteid ning eskiise on saadaval ka teiste tootjate omasid.



Joonis 2.122 - Tranter Supermax [40]

2.5. Jahutusenergia potentsiaal energia ja massiühiku kohta

Alljärgnevate arvutustega leitakse ühes kilogrammis LNG-s sisalduvad energeetilised potentsiaalid. Alampeatükis käsitletakse jahutuspotentsiaali (jahutuseenergia) nii LNG massiühiku kohta ($\text{kWh}_{\text{jahutus}}/\text{kg}$) kui ka kütuse energiasisalduse (alumise kütteväärtuse järgi) kohta ($\text{MWh}_{\text{kütus}}/\text{kWh}_{\text{jahutus}}$). Energiasisalduse võrdlus võimaldab paremini mõista ja võrrelda reaalsuses olemasolevate objektide energeetilisi suurusid ning potentsiaale. Samas näit kWh/kg on valitud seetõttu, et toorainet maagaasi saab massiühiku kohta võrrelda nii gaasilise kui ka veeldatud faasi vahel, sest energeetiline sisaldus kilogrammis on ikka sama olenemata olekust. Samuti on massiühikule üle viidud jahutushulkasid lihtne edaspidiselt võrrelda reaalsete olukordadega, ehk kui projekti tarbitavad gaasi kogused on teada, saab need läbi korrutada vastavate väärtustega ning leida jahutusenergia potentsiaalsed suurused.

Alljärgnevad arvutused on koostatud lihtsustuse eesmärgil metaani kohta, kuna metaan on põhiline LNG koostisosa.

Esmalt on tabelis 2.1 teisendatud 1 kg metaani nii normaaltingimuses kui ka veeldatud faasis mahulisteks suurusteks. 1 kilogramm metaani on temperatuuril 0°C (atmosfäärirõhul) mahult $\sim 1,393$ kuupmeetrit ning veeldatud kujul (-162°C juures) vaid $0,0024$ kuupmeetrit ehk ~ 700 korda väiksema mahuga. Metaani alumine kütteväärtus jääb 50000 kJ/kg juurde ning aurustumissoojus on keemistemperatuuril $510,8$ kJ/kg kohta [29].

Aurustumissoojusest on räägitud täpsemalt eelnenud alapeatükis (pt 2.1 Faasisiirded). Metaani keskmiseks erisoojuseks on võetud 2,12 kJ/kgK kohta ning valik on käsitletud täpsemalt eelnenud alapeatükis (pt 2.2 Erisoojus).

Tabel 2.1 – Metaani algandmed arvutuskäigu tarbeks (atmosfääri rõhul) [29]

Nimetus	Väärtus	Ühik
Metaani kogus (normaaltingimustel)	1,00	kg
	1,39	~m ³ (0°C juures)
Veeldatud metaani maht	0,0024	~m ³ (-162°C juures)
Alumine kütteväärtus	50000	kJ/kg
	13,89	kWh/kg
Aurustumissoojus	510,83	kJ/kg
Erisoojus	2,122	kJ/kgK

Alljärgnevas tabelis 2.2 on tehtud arvutused 1 kilogrammi veeldatud metaani kohta. On leitud vedela faasi (temperatuuril -162°C, rõhul 1 atm) üleviimisel ja soojendamisel temperatuurini -20°C gaasis sisalduv jahutusenergia kogus. Ehk gaasi väljuv temperatuur antud näite puhul on -20°C ja seeläbi on temperatuuride vahe (ΔT) sisendi ja väljundi vahel 142°C.

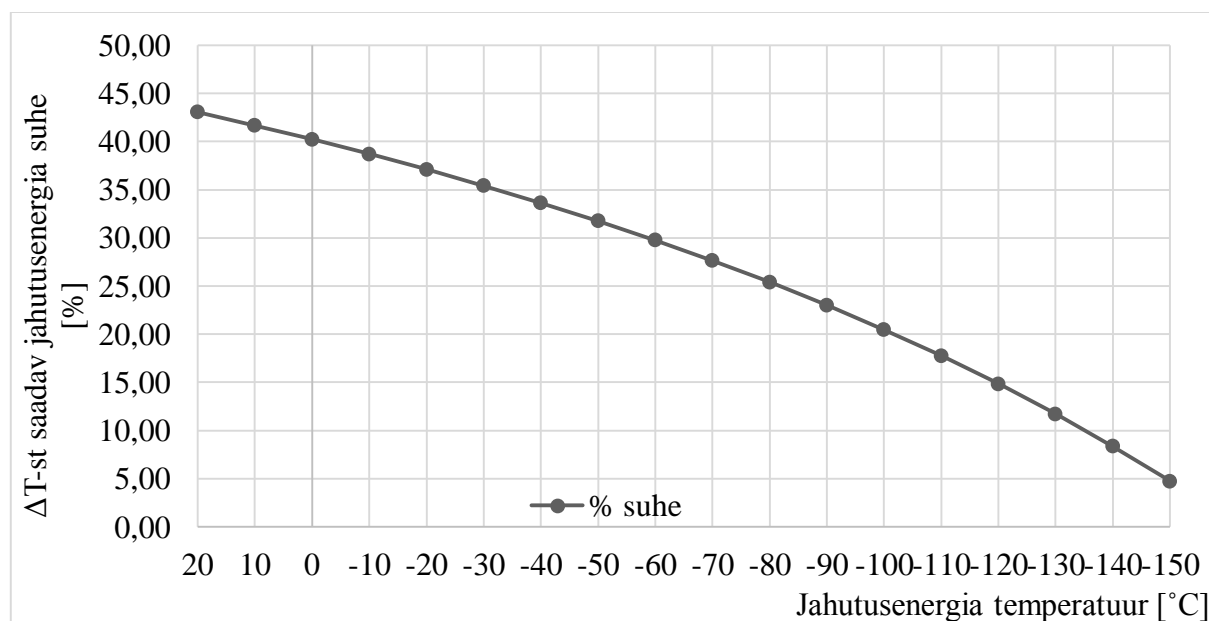
Kuna energia hulk aines ei muutu lineaarselt temperatuuri muutumisega ja seda eriti faasi muutumise hetkel, siis on eraldi välja arvatud jahutusenergia hulk faasi muutusel vedelast gaasiliseks. 1 kilogrammi veeldatud metaani gaasistamisel vabaneb 510,83 kJ/kg kohta ehk 0,142 kWh. Edasi vabaneb järgmine hulk jahutusenergiat temperatuuri tõstmisega (0,084 kWh/kg). See on otseselt seotud metaani erisoojusega, mis on antud parameetrite juures keskmiselt 2,122 kJ/kgK kohta. Ehk 1 kilogrammi veeldatud metaani viimisel -20 °C temperatuuri juurde on võimalik protsessist saada kokku 812,1 kJ/kg ehk 0,226 kWh/kg jahutusenergiat. Võrdluseks 1 kg metaani põletades on vabanev soojusenergia hulk 13,89 kWh.

Täpsemalt saadud 0,226 kWh potentsiaalset jahutusenergiat vaadeldes selgub, et suur osa sellest energiast on saadaval juba ainuüksi faasimuutuse protsessi käigus. See tähendab, et viies aine vedelast olekust gaasilisse olekusse eraldub protsessis jahutusenergiat 0,142 kWh/kg metaani kohta ning pärast seda gaasi temperatuuri tõstmisega -20°C kraadini eraldub 0,084 kWh/kg kohta energiat. Vastavad väärtused on võrreldavad teistest materjalidest leitud arvutustega, kus leitakse samuti LNG taasgaasistamisel tekkiv jääkjahutusenergia. Sealne tulemus jäi 0,23 kWh/kg LNG kohta [41].

Tabel 2.2 – Arvutuskäik 1 kg LNG jahutuspotentsiaali kohta

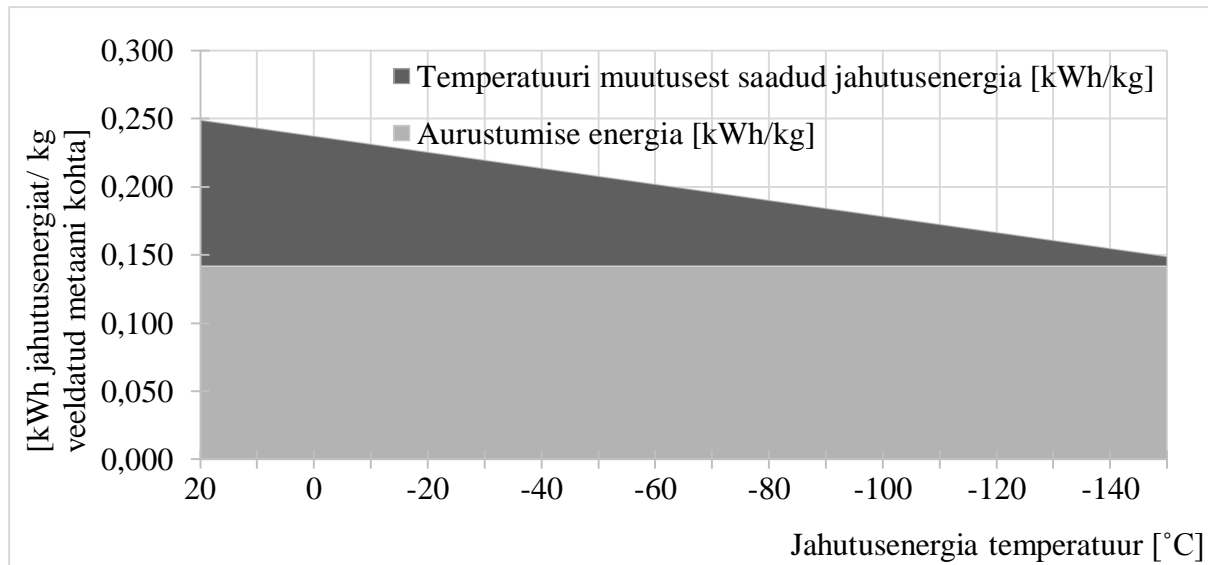
Nimetus	Väärtus	Ühik
Aurustumise energia	510,83	kJ/kg
Saadav jahutusenergia hulk vastava gaasi kogusega (faasi siirdel)	0,142	kWh
Algtemperatuur, T1	-162	°C
Lõpptemp, T2	-20	°C
Temperatuuride vahe, ΔT	142	K
Erisoojus	2,122	kJ/kgK
Saadav jahutusenergia hulk vastava gaasi kogusega (gaasi temperatuuri tõusust)	301,27	kJ/kg
	0,084	kWh
Kokku saadav jahutusenergia hulk	812,10	kJ/kg
	0,226	kWh

Joonisel 2.13 on kajastatud veeldatud metaani temperatuuri tõusuga eralduv jahutusenergia potentsiaal protsentuaalse suhtena faasi muutusest saadav jahutusenergia ning temperatuuri tõusust saadav jahutusenergia. Ehk kui tõsta veeldatud gaasi temperatuur -20°C , siis kogu jahutusenergia hulgast moodustab temperatuuri tõusust saadav osa vaid 37,1%. Ülejäänud 62,9% jahutusenergiast eraldub juba ainuüksi faasi muutuse protsessis.



Joonis 2.13 – Gaasi temperatuuri tõusust saadava jahutusenergia protsentuaalne suhe faasi muutusest saadava jahutusenergia suhtes

Alljärgneval joonisel 2.14 tuuakse välja jahutusenergia hulk ja selle muutus -162°C kraadi juures oleva 1 kilogrammi veeldatud metaani aurustumisel ja temperatuuri tõstmisel kuni $+20^{\circ}\text{C}$ kraadini. Tumehalli värviga alal on kajastatud jahutusenergia hulk, mis on saadud temperatuuri muutusest ning helehalli värviga aurustumisel tekkiv jahutusenergia hulk.

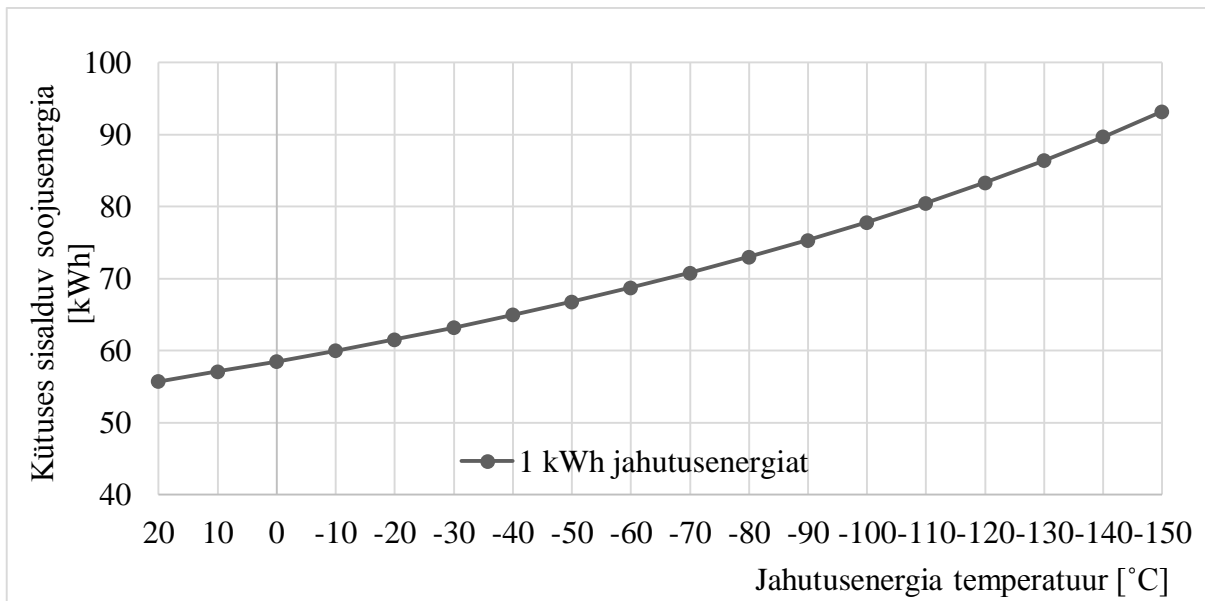


Joonis 2.14 – Jahutusenergia hulk massiühiku kohta sõltuvalt jahutuse temperatuurist

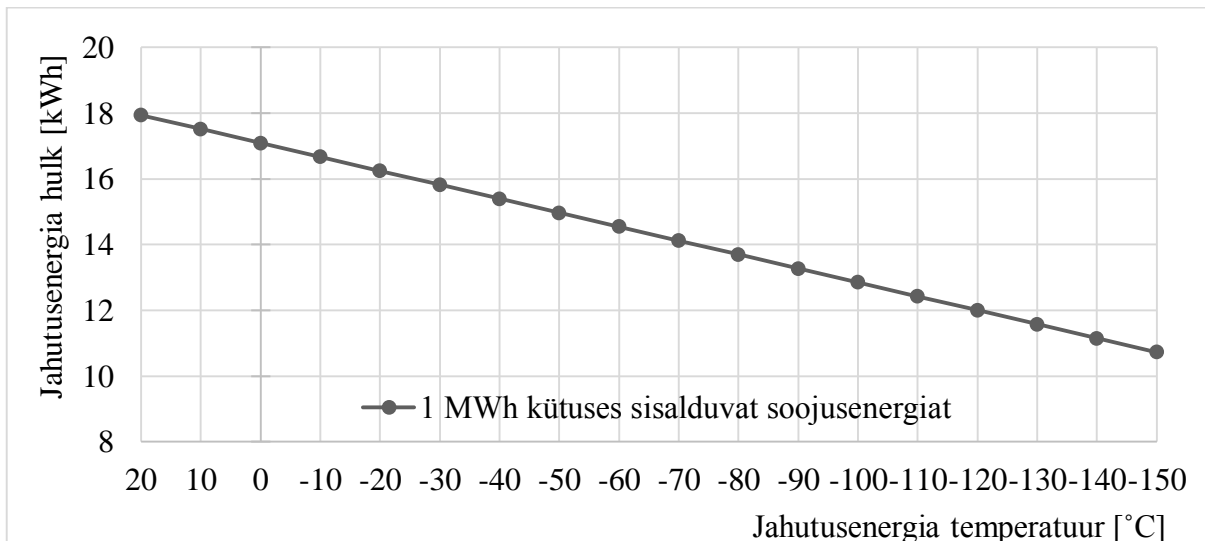
Kogusena vaadeldes on kõige otstarbekam kasutada ära kogu jahutusenergia hulk ehk tõsta temperatuur võimalikult kõrgele. Kui aga võrrelda jahutuse tootmise alternatiive, millest enamlevinud on kompressormasinatega jahutusenergia tootmine, siis selgub, et mida madalamatemperatuurilist jahutusenergiat toota, seda väikemaks muutub seadmete kasutustegur ehk COP (*coefficient of performance*). Seeläbi suureneb kordades jahutusseadmete elektrienergia tarve. Seda tegurit ja sõltuvust jahutuse temperatuurist on täpsemalt kirjeldatud eelnenud alajaotises (pt 2.3 Jahutusprotsessid). Seega kui võtta eesmärgiks üldine kokkuhoid, tuleb võrrelda seda alternatiivsete jahutuse tootmise variantide efektiivsusnäitajatega, et teada saada potentsiaalsed kokkuhoitavad suurused. Seeläbi võib järeldada, et mida madalamat temperatuuri tarbivaid protsesse suudetakse asendada LNG-st saadava jahutusenergiaga, siis seda suurem võib olla ka kokkuvõttes saavutatav kokkuhoid elektrienergiast.

Kui aga jälgida LNG massiühiku kohta saadavat soojusenergia hulka ning võrrelda seda saadava potentsiaalse jahutusenergia kogusega, siis näiteks 1 kg metaani aurustamisel ja soojendamisel 0°C kraadini on saadav jahutusenergia hulk 0,237 kWh. Põletades sama koguse aurustunud gaasi on võimalik saada 13,89 kWh soojusenergiat, ehk potentsiaalse

jahutusenergia ja kütuses sisalduva soojusenergia vahe on umbes 60-kordne. Alljärgneval joonisel 2.15 on võrreldud jahutusenergia ja soojusenergia hulga erinevusi sõltuvalt eri temperatuuridest, mis temperatuurilist jahutusenergiat kasutatakse. Ehk mida väiksem on joonel olev väärtus (joonis 2.15), seda rohkem jahutusenergiat on võimalik saada võrreldes eralduva soojusenergiaga (joonisel 2.16 on toodud pöördseos). Neid seoseid saab üle kanda ka suurematele võimsustele, kus kordsusarv on sama. Näiteks, kui veeldatud gaas sisaldab 1 MWh soojusenergiat, siis jahutusenergiat, mis on temperatuuril -10°C , on võimalik toota ~60 korda vähem ehk ~17 kWh ja vastupidi. Seda kajastab joonis 2.16.



Joonis 2.15 – Kütuses sisalduv soojusenergia hulk võrreldes jahutusenergia potentsiaaliga



Joonis 2.16 – Veeldatud gaasist saadav jahutusenergia kogus sõltuvalt tarvitatavast jahutusenergia temperatuurist 1 MWh kütuses sisalduva soojusenergia kohta

Alljärgnevas tabelis 2.3 tuuakse vastav näide, kui palju elektrienergiat kulutaks kompressormasin, mille COP on 2,2 (väärtus, kui seade peab tootma -20°C jahutusenergiat +40°C kondenseerumistemperatuuriga) 1 kilogrammi veeldatud metaani taasgaasistamisel saadava jahutusenergia tootmiseks. Selgub, et aastane kokkuhoid 1 kg metaani kohta oleks eelnevas tabelis 2.2 toodud väljundtemperatuuride põhjal 0,012 eurot (tabel 2.3). Kuna hetkel on vaadeldud väga väikeseid mahte, siis tunduvad võimalikud kokkuhoidud väikesed.

Tabel 2.3 – Kulu kompressorseadmega 0,226 kWh jahutuse tootmiseks

Nimetus	Väärtus	Ühik
COP	2,2	
Elektri kogus jahutusenergia tootmiseks	0,1025	kWh
Elektri hind	0,120	eurot/kWh
Kulu (võimalik saavutatav kokkuhoid)	0,012	eurot

Töö järgmises punktis (3. LNG-st jahutusenergia tootmise otstarbekuse ja võimalikkuse hinnang ettevõtete näitel) on kajastatakse reaalseid vajadusi ning koguseid, millega tööstused töötavad.

3. LNG-st jahutusenergia tootmise otstarbekuse ja võimalikkuse hinnang ettevõtete näitel

Alljärgnevalt kajastatakse Eestis asuvate ettevõtete reaalsete näitajate ning planeeritud jahutustootmise muutmiste baasil arvutused veeldatud metaani temperatuuri tõstmisel saadava jahutusenergia kasutamise otstarbekuse kohta. Need ettevõtted juba kasutavad oma tootmisprotsessis stabiilsetes kogustes LNG-d ning tarbivad kompressormasinate abil toodetud jahutusenergiat aastaringsest. Järgnevates arvutustes (alapunktides 3.1; 3.2) rakendatakse eelnevalt (peatukis 2. Jääkjahutusenergia kasutamise teoreetilised alused) kirjeldatud arvutusmeetodeid ning iseloomulikke tegureid.

Lisaks jahutusenergia teoreetilisele kogusele on välja toodud ka lihtsustatud lahendused, kuidas LNG aurustamisel tekkivat jahutusenergiat tootmisprotsessiga ühildada ning seda tarbijani transportida. Samuti leitakse energia transpordil tekkivate kadude suurusjärgud. Viimases alajaotuses võrreldakse tulemusi ja võimalikku kokkuhoidu nii materiaalsest kui ka keskkondlikust aspektist.

Arvutused tehakse puhtale metaanile, kuna see on põhiline LNG komponent (Eestisse imporditud LNG-s on üle 97% metaani). Sõltuvalt eksportijast on erinevate lisagaaside kogused ja hulgad muutlikud ning tulemus jääks mingil määral ikkagi ebatäpseks. Juhul kui soovitakse aurustada teiste parameetritega veeldatud gaasisegusid, siis vajadusel tuleks lähteandmeid täpsustada.

3.1. Saaremaa jaama näitel jahutusenergia potentsiaal

Saaremaal on LNG tarbijateks piimakombinaat (tarbimine ~700 tonni LNG-d aastas) ja lihatööstus (~500 tonni LNG-d aastas). Mõlema tööstuse tarbimine on ühtlane ning gaasiga varustamine toimub ühe aurustijaama kaudu. Tarbijad ise asuvad jaama kõrval ning gaas jõuab nendeni gaasitrassi kaudu. Potentsiaalse jahutusenergia tarbimise üksus asetseks trassi koridori kaudu maksimaalselt 100 meetri kaugusel gaasistusjaamast.

Antud lähteandmete baasil koostatakse reaalsed arvutused tarbijate ja LNG jaama kohta.

Hetkel imporditakse LNG-d Venemaalt terminalidest, kus ei jahutata seda niivõrd madalatele temperatuuridele (~140°C) ning hoitakse gaas vedelas faasis rõhu abil. Seega toimub ka hoiustamine Eesti mahutites ~9 bar (900 kPa) rõhu all (vedeliku temperatuur mahutis hoitakse

~ -135°C). Temperatuurist -135°C kuni -5°C (arvestades jahutusenergia parameetreid) jääb keskmiseks erisoojuseks vastaval rõhul veeldatud faasis 3,729 kJ/kgK ning erisoojuseks gaasilises olekus 2,388 kJ/kgK. Antud temperatuuri ja erisoojust kasutatakse ka arvutustes (tabel 3.1).

Piimatööstuse üks suurimaid jahutusenergia vajadusi on piima jahutamine niinimetatud jääveega (~0°C) jahutusmahutites. Täpsemad andmed hetkel Saaremaa Piimatööstuses reaalselt kasutusel olevate seadmete ning jahutusprotsesside kohta kirjeldatakse alljärgnevalt:

- Jääpank, mille jahutamiseks kasutatakse kolme kompressorit Bitzer 4G20.2. Jahutusvõimsus on 170 kW, kusjuures $T_o = -5\text{ °C}$ / $T_c = +40\text{ °C}$ (kus T_o on aurusti poolne väljundtemperatuur ning T_c on kondensaatori poolele välja antav temperatuur). Elektritarbimine 58 kW, kasutegur $COP = 2,93$. Külmaaineks antud seadmetes kasutatakse R404a.
- 50-tonnise veemahuti jahutus - see toimub nelja kompressori abil, mudel: Bitzer 4NES 20Y, jahutusvõimsus 176 kW ($T_o = -1\text{ °C}$ / $T_c = +40\text{ °C}$), elektritarbimine 48,5 kW, seadmete kasutegur $COP = 3,62$. Külmaaineks on kasutatud R407F.
- Vadaku pastöörast väljuva vee jahutamiseks kasutatakse kompressorit Bitzer HSK6164-60, neid on jahutusprotsessi jaoks 2 tk. Jahutusvõimsus seadmetel 306 kW ($T_o = +2\text{ °C}$ / $T_c = +40\text{ °C}$), elektritarbimine 90,2 kW ning kasutegur $COP = 3,39$. Külmaaineks kasutatakse R404a.

Kokku teeb see kompressormasinate näol Saaremaa Piimatööstus AS-i jahutusvõimsuseks ~ 650 kW.

Andmetest selgubki, et mida madalamale on vaja temperatuuri viia, seda väiksemaks langeb ka efektiivsusategur. Kuna veeldatud maagaas on piisavalt jahe, siis alljärgnevalt on simuleeritud arvutusprotsess (tabel 3.1) jääpanga jahutamiseks temperatuuriga -5°C, mis on sama nagu kompressormasinate väljundtemperatuur.

Kuna arvutused on tehtud metaani kohta, siis 1200 tonnist (ühe aastane LNG kogus Saaremaa jaamal) veeldatud metaanist saame antud parameetritega teoreetiliselt ~277 MWh/aastas jahutusenergiat. See teeb ~31 kW jahutusvõimsuse -5°C temperatuuri juures. Seega oleks LNG-st saadav jahutusenergia hetkel kasutusel olevatele seadmetele vaid osaliselt abiks (~ 5% kogu Saaremaa Piimatööstus AS-i jahutusvõimsusest; jääpanga jahutusvõimsusest ~ 18%) ning puudujääv jahutus tuleks toota kompressormasinatega.

Kui Eestisse importida LNG-d Euroopast või teistest terminalidest, kus pakutava LNG temperatuur on madalam ehk ligikaudu -160°C juures ja rõhul 1 atm (101.325 kPa), kasvaks ka jahutuse energeetiline potentsiaal. Ehk kui algtemperatuur T1 oleks -160°C , siis jahutusenergia hulk suureneks ligikaudu 4 MWh/aastas (umbes 1,5%) ning jääks teoreetiliselt ~280 MWh/aastas juurde.

Tabel 3.1 – Saaremaa LNG jaama potentsiaalne aastane jahutusenergia hulk

Nimetus	Väärtus	Ühik
Metaani kogus (normaaltingimustel)	1 200 000	kg/aastas
	1 672 080	m ³ (0°C juures)
Veeldatud metaani maht	2829	m ³
Alumine kütteväärtus (metaan)	50 000	kJ/kg
	13,89	kWh/kg
Aurustumissoojus (keemispunktil)	510,83	kJ/kg
Keskmine erisoojus veeldatud faasis ($-135^{\circ}\text{C} \dots -126^{\circ}\text{C}$)	3,729	kJ/kgK
Keskmine erisoojus gaasistatud faasis ($-125^{\circ}\text{C} \dots -5^{\circ}\text{C}$)	2,388	kJ/kgK
Kütuses sisalduv soojusenergia hulk	16 667	MWh
Saadav jahutusenergia hulk faasi muutusest (vastava gaasi kogusega)	170,3	MWh
Algtemperatuur T1	-135	°C
Lõpptemperatuur T2	-5	°C
Temperatuuride vahe ΔT	130	K
Saadav jahutuse hulk temperatuuri tõusust	320,13	kJ/kg
Saadav jahutuse hulk temperatuuri tõusust (vastava gaasi kogusega)	106,7	MWh
Kokku saadav jahutusenergia hulk	831	kJ/kg
	277	MWh
Jahutusvõimsus	31,6	kW

Kui LNG-st saadavat 277 MWh jahutusenergiat toota hetkel installeeritud kompressormasinaga, mille efektiivsusnäitaja COP tegur on 2,92, siis oleks kokkuhoid aastas 11344 eurot. 10 aasta peale teeks see ~113440 eurot (tabel 3.2). Selles summa saab võtta teoreetiliseks piirinvesteeringu (investeering, mille puhul lihttasuvusaeg on 10 aastat) suuruseks, et ehitada tehasele lisajahutussõlm ning installeerida veeldatud maagaasi jaamale

sobiv soojusvaheti süsteem. Arvutustes kasutatav elektri hind on 120 eurot/MWh, mis tulevikus peaks eelduste kohaselt olema veelgi kõrgem ning kokkuhoid tuleks veelgi suurem [42].

Samas tuleb projektides meeles pidada, et kompressormasinate niinimetatud jääkproduktiks on omakorda soojusenergia, mida on võimalik näiteks hoone kütteks ära tarvitada. Kui kompressormasina osaline tootlikkus asendada LNG-st saadava jahutusenergiaga, siis suureneb ka veidi gaasi tarbimine, kuna soojusenergiat tuleb toota asemele gaasist. Seda vaid olukorras, kus juba suudetakse ära kasutada enamik kompressormasinatest tekkivast jääksoojusest, mis jääb võimalusel samasse suurusjärku nagu on ka seadme jahutusvõimsus.

Tabel 3.2 – Aastane jahutusenergia tootmise kulu kompressormasinaga

Nimetus	Väärtus	Ühik
COP	2,93	
Elektri kogus jahutusenergia tootmiseks aastas	94,5	MWh
Elektri hind	120	eurot/MWh
Kulu (võimalik saavutatav kokkuhoid)	11 344	eurot

Tähelepanu tuleb pöörata sellele, et antud jahutusenergia kogused olid kirjeldatud ilma kaota. Ehk protsessides ja samuti ka jahutusenergia transpordil esinevad mitmed kaod. Need tuleb teoreetiliselt saavutatavast kokkuhoiust maha arvestada.

3.1.1 Energiakaod jahutusenergia ülekandmisel

Lahendades jahutusenergia transpordiprobleeme ja selgitades välja sealne energiakadu, siis hetkel eeldatav jahutustorustiku pikkus oleks 100 meetrit. Seda peab vedelik läbima topelt ehk nii piimavanni jahutussärgini kui ka LNG aurustini tagasi. Tänapäeval on saadaval eelisoleeritud niinimetatud paaristorud, kus ühe jämedama isolatsiooni sees on isoleeritud nii pealevoolu- kui ka tagasivoolu torud. Järgnevates arvutustes kasutataksegi vastavat torude varianti ettevõtte Uponor tootevalikust. Toru nimetus on Uponor Thermo Twin, mida on saadaval erinevates läbimõõdudes (25–63 mm). Toru on elastne ning Uponori tootespetsialisti andmetel talub temperatuuride vahemikku -100...+95°C. Samuti on võimalik torusüsteemi paigaldada nii pinnasesse kui lisaks ka väliskeskkonda, kuna isolatsioonimaterjal on UV-kindel. Voolutoru materjaliks on kahte tüüpi torusid: PE-Xa, EVOH, SDR 11, mis talub 6 baari survet või mudel PE-Xa, EVOH, SDR 7.4, mis talub 10 baari survet. Isolatsioonimaterjaliks on kasutatud ristsidemetega PE-vahtu. Kaitseümbrise materjal on PE-HD (PE 80). Eelisoleeritud toru müüakse kuni 200-meetrise rulliga [43].

Kui aastane jahutusenergia kogus on 262 MWh, siis jagades see aasta peale on jahutusvõimsus 29,9 kW. Selle alusel on võimalik välja arvutada torus voolava vedeliku kogus.

Uponori materjalidest saada oleva valemi 3.1 alusel leitakse vooluhulk (kg/s).

$$m = \frac{Q}{\Delta T \cdot C_p} = \frac{31,6}{(10 \cdot 4,19)} = 0,75 \text{ kg/s} \quad (3.1)$$

kus m – vooluhulk kg/s;

Q – võimsus kW;

ΔT – temperatuurimuutus K;

C_p – vedeliku nominaalne soojamahutavus (vee puhul 4,19 KJ/kgK), (propüleen glükoolil 2,512 KJ/kgK) [43].

Arvutustest järeldub, et kui soojusülekaneks kasutada vett (tegelikkuses näiteks glükoolilahust), siis 10 K temperatuuride vahe juures on vaja hoida veehulk 0,75 kg/s ehk ~2700 kg/tunnis. Kui aga teha sama arvutus propüleenglükooli kohta, siis selle vedeliku soojusmahtuvus on väikesem ning vooluhulk suureneks kohe märgatavalt ehk $m = 1,26$ kg/s ehk ~4500 kg/tuunis. Vastav näitaja muutuks ka kohe, kui dimensioneerida ringi pealevoolu ja tagasivoolu temperatuurid. Lisas (L. 5 Uponor torustiku dimensioneerimine) on kajastatud torude kiirvaliku tabel [43]. Kui jälgida vastavat tabelit, siis on näha, et 30 kW seadme vooluhulk peaks jääma vee puhul ~2600kg/s juurde. Soovituslik voolukiirus peaks olema 0,5...1 m/s vahel [44].

Kuna täpsemad arvutused tuleb teha tegeliku külmaagensi kohta lähtudes hinnast ja täpsematest nõudmistest, siis esialgset kiirvalikut tehes oleks optimaalne valik, et tagada jahutus, 50 mm läbimõõduga trass. Seeläbi peaks voolukiirus jääma ~0,55 m/s vee puhul ning propüleenglükooli puhul ~0,95 m/s .

Hinnapäringust saadava info alusel on 100-meetrine 50 mm läbimõõduga eelisooleeritud toru maksumus ligikaudu 5700 eurot. See hind sisaldab ainult materjali.

Jahutusenergia kadu trassis sõltub, kuhu on toru paigaldatud – pinnasesse või on tehtud maapealne installatsioon. Kui Saaremaa tööstuse vajadustest lähtuda, siis jahutusvedelik, mille temperatuuri tuleb hoida, on temperatuuril ~0°C. Sellest sõltuvalt peaks trassis voolama veidi madalama temperatuuriga vedelik sõltuvalt soojusvahetitest, esialgsel valikul

näiteks -10°C ... -5°C . Torustiku pinnapealse paigalduse juures on tuleb jälgida välisõhutemperatuure. 1981. kuni 2010. aastate lõikes on Eesti keskmine välisõhu temperatuur $6,0^{\circ}\text{C}$, mis on jahutusprotsessi seisukohalt hea näitaja [45]. Jahutusenergiat hakkab trass tarbima suveperioodidel, kui päike kütab trassi ning välisõhutemperatuur on kõrgem, kui vedeliku temperatuur sees. Oletades, et välisõhu temperatuur on $+20^{\circ}\text{C}$ ning torustikus voolava vedeliku temperatuur jääb -5°C juurde, on tootja andmetel 2x50 mm trassi keskmine energiakadu torustikus ~ 8 W/meetri kohta. 100 m paaristorustiku kohta teeb see antud temperatuuride juures 800 W, kui kogu jahutusvõimsus on $\sim 31,6$ kW. Kuna kadu leiab aset vaid teatud ajal aastas, siis esialgse tulemi ning antud toruvaliku baasil on üsnagi väike puudujääk – ligikaudu alla 3% toodangust.

3.2. Jahutusenergia potentsiaal Paide pagaritööstuse sügavkülmutuse näitel

Paides tegutseb pagaritööstus, mis valmistab lisaks teistele pagaritoodetele ka sügavkülmutatud pirukaid. Tööstuse poolne huvi on vähendada energiatarvet just nimelt niinimetatud šokk-jahutuse tootmiseks, kus temperatuur peab olema alla -30°C . Selle temperatuuri tootmiseks peavad hetkel kasutusel olevad kompressormasinad tegema aga märksa rohkem tööd ühe jahutusenergia ühiku tootmiseks, kui Saaremaal 0°C tootmiseks ning seetõttu langeb ka kompressormasinate efektiivsustegur. Alljärgnevas tabelis 3.3 tehtud arvutused selgitavad välja, kui palju muutuvad jahutuse tootmise võimsused veeldatud metaanist, kui kasutada ära energiahulk kuni -38°C kraadini.

Kontakteerudes nii Saaremaa kui ka Paide pagaritööstuses jahutusseadmeid haldava firmaga Cooltec OÜ-ga selgus, et Paide pagaritööstuse sügavkülmutusseadmed kompressormasinate näol uuenevad ning masina jahutusenergia tootmise võimsus hakkab olema 440 kW, selle juures on seadme elektriline võimsus keskmiselt 350 kW elektrienergiat. Temperatuur, millega sügavkülma jahutatakse on -38°C . Kompressormasinate on agensina kasutatud ammoniaaki (R717). Seega on niivõrd madalate temperatuuride juures sealsete sügavkülmutusseadmete kasutustegur COP vaid $\sim 1,26$.

Algandmetesse on lisatud ka veel see, et aastane tehase LNG tarve on stabiilne ning jääb 1000 tonni juurde. Samuti on tabel 3.3 koostatud hetkel imporditava -135°C temperatuuri juures oleva LNG põhjal. Temperatuurist -135°C kuni -38°C jääb keskmiseks erisoojuseks rõhul

9 bar (900 kPa) veeldatud faasis 3,729 kJ/kgK ning erisoojuseks gaasilises olekus 2,452 kJ/kgK.

Arvutustest järeldub, et -38°C kraadise jahutusenergia hulk jääb hetkeliste algparameetrite puhul (-135°C ja 9 atm) aastas ~208 MWh. Ehk jahutusvõimsus oleks ligikaudu 24 kW.

Kui Eestisse importida LNG-d Euroopast või teistest terminalidest, kus pakutava LNG temperatuur on madalam ehk ligikaudu -160°C juures ja rõhul ~1 atm (101.325 kPa), kasvaks ka energeetiline potentsiaal. Ehk kui algtemperatuur T1 oleks -160°C, siis jahutusenergia hulk suureneks ligikaudu 6 MWh/aastas (kasv 3%) ning jääks teoreetiliselt ~214 MWh/aastas juurde.

Tabel 3.3 – Paide LNG jaama potentsiaalne aastane jahutusenergia hulk

Nimetus	Väärtus	Ühik
Metaani kogus (normaaltingimustel)	1 000 000	kg/aastas
	1 393 400	m ³ (0°C juures)
Veeldatud metaani maht	2358	m ³
Alumine kütteväärtus (metaan)	50 000	kJ/kg
	13,89	kWh/kg
Aurustumissoojus (keemispunktil)	510,83	kJ/kg
Keskmine erisoojus veeldatud faasis (-135°C...126°C)	3,729	kJ/kgK
Keskmine erisoojus gaasistunud faasis (-125°C...-38°C)	2,452	kJ/kgK
Kütuses sisalduv soojusenergia hulk	13 889	MWh
Saadav jahutusenergia hulk faasi muutusest (vastava gaasi kogusega)	141,9	MWh
Algtemperatuur, T1	-135	°C
Lõpptemperatuur, T2	-38	°C
Temperatuuride vahe, ΔT	97	K
Saadav jahutuse hulk temperatuuri tõusust	238	kJ/kg
Saadav jahutuse hulk temperatuuri tõusust (vastava gaasi kogusega)	66,1	MWh
Kokku saadav jahutusenergia hulk	749	kJ/kg
	208	MWh
Jahutusvõimsus	23,74	kW

Seega LNG-st saadava jahutusenergiaga ei ole võimalik katta kogu pagaritööstuse jahutusenergia vajadust ning gaasistist saadav jahutusenergia hakkaks toetama hetkel installeeritud kompressormasinaid (saab toota ~ 5,5% vajalikust jahutusenergiast). Seeläbi väheneb kompressormasinatega tehtava töö maht ning ka tarbitud elektrienergia kogus.

Tabelis 3.4 arvatatakse aastane võimalik elektriline kokkuhoid tootes -38°C jahutusenergiat LNG aurustamise protsessiga. Kui elektri hind on 120 eurot MWh kohta ning võrreldava külmutusseadme COP tegur on 1,26, siis kokkuhoid oleks aastas 19651 eurot. 10 aasta peale teeks see juba ~196000 eurot, mille võib võtta teoreetiliseks piirinvesteeringu suuruseks 10 aasta kohta. Seega sellest saab järeldada taas, et LNG aurustumisel tekkivat jahutusenergiat oleks kõige mõistlikum kasutada võimalikult madalat temperatuuri nõudvate protsesside energiatarve katmiseks. Seda seetõttu, et väga madalatemperatuurilist jahutusenergiat kompressormasinaga tootes on selle efektiivsus väga väike. Tasub tähelepanu pöörata, et arvutuskäigus ei kasutatud hetkel ära -38°C kõrgematel temperatuuridel kasutatavaid jahutusvõimsusi, ehk jäi kasutamata ~ -30°C ja ~ 0°C vahele jääv jahutusenergia. Kuna pagaritööstuses on ka ~ 0°C vajavaid jahutusenergia tarbijaid, siis seda oleks üsnagi lihtsalt võimalik ära kasutada ühe lisa soojusvahetiga, kui paigaldada see pärast niinimetatud šokikülma soojusvahetit tagastuva trassi vahele.

Tabel 3.4 – Aastane elektrienergia kulu kompressormasinaga LNG-st saadava jahutusenergia tootmiseks

Nimetus	Väärtus	Ühik
COP	1,27	
Elektri kogus jahutusenergia tootmiseks aastas	164	MWh
Elektri hind	120	eurot/MWh
Kulu (võimalik saavutatav kokkuhoid)	19 651	eurot

3.2.1 Energiakaod jahutusenergia ülekandmisel

Taaskord peab tähelepanu pöörama sellele, et antud tulemused on hetkel kajastatud ilma kadudeta ning reaalses olukorras on kasutatav jahutusenergia kogus veidi väiksem. Üks oluline komponent jahutusenergia kadude protsessis on selle transport tarbijani. Paides asuva jaama juures jahutusenergia kasutamiseks vajalik trass tuleks rajada pinnasesse ning seeläbi saab torustiku planeerimisel lähtuda suhteliselt stabiilsest aastaringsest pinnase temperatuurist. Antud temperatuuride juures on vastavalt tootjalt saadud info alusel samuti võimalik kasutada

näiteks eelisoleeritud Upnori paaristoru. Vastavalt antud näitele, kus trassis voolava vedeliku temperatuuri ja pinnase temperatuuride vahe on $\sim 45^{\circ}\text{C}$, on energiakadu meetri kohta 13 W, see võib mingil määral reaalsest kindlasti erineda, sõltuvalt pinnase niiskuse astmest ja teistest oludest, mis trassivalikuga kaasnevad [43]. Esialgse info kohaselt on projekteeritava trassi pikkuseks samuti 100 meetrit. See teeb trassi energiatarbeks ligikaudu 1300 W, mis on LNG gaasistamisel saadava jahutusenergia hulgast ligikaudu 5,7%. Täpsemad süsteemi üldised kaod saab välja arvutada, kui kogu süsteem on projekteeritud ning on teada spetsiifilised komponendid. Kui 100-meetrise trassi kadu jääb alla 6%, siis ei tohiks eelduste kohaselt ka kogu süsteemikaod seda oluliselt ületada, kuna süsteemi teised põhilised osad - soojusvahetid on enamasti väga heade efektiivsusnäitajatega.

3.3. Jahutamise tehnoloogilised võimalused

Kui on vaja jahutada keskkonda temperatuurini kuni -40°C siis üks potentsiaalne võimalik variant on kasutada LNG soojendamiseks läbi soojusvaheti glükooli. Täpsemalt näiteks toiduainetööstustele sobiliku propüleenglükooli lahuse jäätumise temperatuur on $\sim -60^{\circ}\text{C}$ ning kui aine püsib pidevas ringluses, ei teki probleeme jäätumise ohuga [46].

Hetkel kasutuses olevate piimatööstuse süsteemide juurde LNG-st saadava jahutusenergia süsteemi lisamine ei ole tehniliselt keerukas ja ei vajaks eriseadmeid ning suuri ümberehitusi. Seega saaks kasutada LNG soojendamiseks ning piimavanni jahutamiseks lihtsaid soojusvaheteid, mille sees toimib soojusagensina glükool ning seda ajab ringi tsirkulatsioonipump.

Kuna jahutusseadmed kompressormasinade näol on piimatööstuses juba olemas, siis vajadusel saab LNG-st puuduoleva jahutusenergia koguse toota nendega. Juba paigas olevaid kompressorseadmeid selle variandi käigus ei muudetak.

Paides vajaminevat -38°C jahutusenergiat on võimalik samuti soojusvahetite ja pumpadega vajalikku hoonesse transportida, kus seal see läbi vedelik-õhk soojusvaheti külmhoonesse üle antakse. Antud temperatuuride käigus, kus tagastuvad temperatuurid on samuti väga madalad, võib tekkida soojusvahetis oht külmakandja kristalliseerumiseks soojusvahetite seinte ligidal ja oht faasimuutuseks. Selle tulemusena halveneb soojusülekanneegur või muutub soojusvaheti üldse töökõlbmatuks. Selle tõkestamiseks tuleb valida väga madala jäätumise punktiga aine. Kindlasti peab külmainet ringi pumpav pump olema varustatud alternatiivtoitega, mis tagab ka aine tsirkuleerimise võrgutoite puudumisel. Samuti peab süsteem olema igal hetkel kiirelt

valmis üle minema juba hetkel kasutatavatele aurustitele. See vajadus tekib siis, kui leiab aset jahutussüsteemi rike ning on oht külmaine jäätumisele ning soojusvaheti purunemisele.

Täpsemate torustike, soojusvahetuspindade ning soojusvahetite valikuprotsessides tuleb konsulteerida neid tootvate firmadega. Jahutusenergiat vajavate tarbijate täpsemate andmete baasil saab valida just neile sobivad seadmed ja koostada projekteeritud lahendused.

3.4. Kokkuvõid

Euroopa direktiivid näevad ette, et Euroopa Liit, kaasa arvatud Eesti, peab minema üle rohkem energiatõhusamale majandusele ning tuleks saavutada primaarenergia kokkuvõid. Kusjuures seeläbi on võimalik vähendada sõltuvust energiaimpordist ning seoses väiksema energia tarbimisega ühiku kohta, on võimalik kulutõhusalt vähendada kasvuhoonegaaside heidet ja leevendada läbi selle kliimamuutust [2]. Isegi Euroopa komisjoni eelnõu identifitseerib LNG taasgaasistamise näol jääkjahutuse kui suure potentsiaali energia kokkuvõid [1].

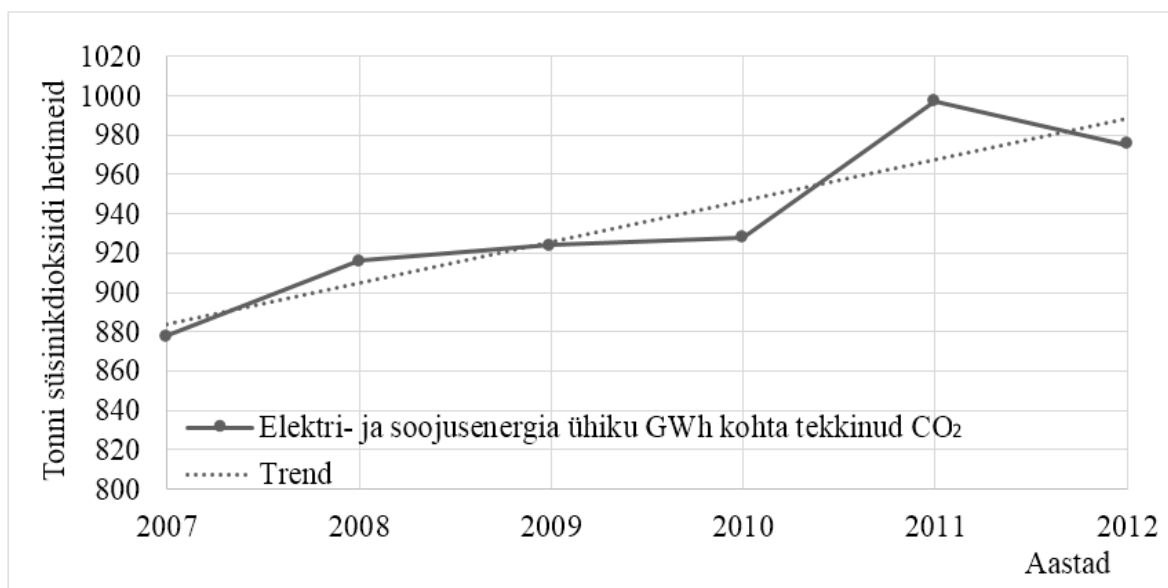
Seoses sellega, kui kasutatakse ära LNG potentsiaalset jahutusenergiat, suudetaks saavutada ka primaarenergia kokkuvõid ning liikuda väike samm eesmärkidele lähemale. See on oluline, kuna juba praegu tarbib jahutusenergia 17% maailma elektrist ja toodab 10% CO₂ emissioonist [47].

Eestis on energiakandjate kaalumistegur (tegur, millega võetakse arvesse tarnitud energia tootmiseks vajalik primaarenergia kasutus ja selle keskkonnamõju) elektrit kasutavale seadmele 2 kordne [48].

Ehk kui seade hoidis kokku Paide näitel ~160 MWh/aastas elektrienergiat, võib lugeda, et hoiti kokku ~320 MWh jagu primaarenergiat (energiaressursse). Saaremaa jaama puhul on võimalik kokkuvõid ~95 MWh elektrienergiat ehk 190 MWh jagu primaarenergiat aastas. energiaressursse.

Eestis toodetakse enamik elektrist siiani põlevkivist. Kui jälgida riigikontrolli aruannet, siis selle alusel saab väita, et aastast aastasse tõusevad elektri- ja soojusenergia tootmisel tekkivad CO₂ heitmete kogused. 1 MWh elektrienergia tootmisel eraldub ligikaudu 1 tonn CO₂ heitmeid (joonis 3.1).

Paide näitel kokku hoitud 160 MWh elektrienergiaga on võimalik vähendada üle 160 tonni CO₂ heitmeid aastas. Ning vastavalt Saaremaa puhul ~ 95 tonni CO₂ heitmeid aastas.



Joonis 3.1 - Põlevkivist elektri- ja soojusenergia tootmisel tekkinud CO₂-heitmed aastatel 2007–2012 (tonnides GWh kohta) [49]

Kui järgida töös koostatud eelnevaid andmeid, siis maailmas tarbitakse LNG-d hetkel ~250 miljonit tonni aastas ning teoreetilistest arvutustes selgus, et LNG (temperatuuril -162°C ja rõhul 1 atm) omab jahutusenergia (0°C) potentsiaali ~240 kWh/tonni LNG kohta (alapeatükk 2.5 Jahutusenergia potentsiaal energia ja massiühiku kohta, joonis 2.15) . Ehk ühe aasta maailma LNG toodangust vabaneb ligikaudu 60 miljonit MWh jahutusenergiat. Kui vastavat jahutusenergiat toota kompressormasinatega, mille COP tegur on 3, siis kulub selleks 20 TWh elektrienergiat. Andmete võrdluseks – Eesti 2015, aasta elektrienergia tarve koos kadudega oli 8,1 TWh [50]. Ehk maailma LNG-st vabaneva jahutusenergia taastootmiseks peab kulutama kaks ja pool korda suurema elektrienergia hulga kui terves Eesti riigis aasta jooksul kokku tarbitakse.

Üle maailma saab LNG gaasistamisel tekkivat jahutusenergiat ära kasutada vastavalt vajadustele ja jaamade suurustele (toodangu mahtudele), mille abil jahutusenergia tekib. Suurte terminalide juurde on võimalik rajada piisavat taristut omades näiteks teiste gaaside/ainete veeldamise tööstus. Samuti on võimalik teoreetiliselt rajada LNG jahutusenergia ja näiteks merevee vahel asetleidvate temperatuuride erinevuse abil ORC (inglise keelest *organic rankine cycle*) jaam ehk termaalõli soojuskandja vahendusel energia üle kandmine elektri tootmiseks [41]. Võimalusi on veelgi, näiteks LNG abil ANG (inglise keelest *Adsorbed Natural Gas* ehk adsorbeeritud maagaas) tootmine [51]. Tekkiva jahutusenergia tarvitamise valdkondi ning võimalikke tarbimislahenduste ideid, mille seast saab valida, on palju.

Kokkuvõte

LNG esimene tootmise tehas rajati 20. sajandil ning populaarsust hakkas see tehnoloogia koguma alles sajandi lõpu poole. Statistika alusel kasvavad toodangu ja tarbimise mahud iga aastaga ning eelduste kohaselt on see nii ka tulevikus. Alates 2000. aastast kuni tänaseni on LNG tarbimise mahud kasvanud 2,5 kordseteks ehk hetkel ületab tarbimine 250 miljonit tonni aastas.

Maagaasi veeldatakse jahutusprotsessi abil, kus viiakse gaasi temperatuur väga madalale - atmosfäärirõhul toimub loodusliku gaasi veeldumine temperatuuril -162°C . Selle protsessi käigus väheneb gaasi maht ligikaudu 600 korda. Omadustelt sarnaneb LNG maagaasile, kuna see on ka produkti algmaterjaliks. Täpsemad omadused ja keemiline koostis sõltub samuti LNG algmaterjalist ehk maagaasi kvaliteedist. LNG tootmise käigus puhastatakse gaasi ning jahutusprotsessi käigus separeeritakse erinevate veeldumise temperatuuride abil välja teisi gaase, mis vähendavad LNG kvaliteeti. Seega on LNG veelgi puhtam kütus kui maagaas. Põhiliselt koosneb veeldatud maagaas metaanist (Eestis kasutatavas kütuses keskmiselt 97% metaani), millele lisandub väikestes kogustes etaani, propaani, butaani ja lämmastikku. Metaan on õhust kergem lõhnata gaas, mistõttu võimaliku lekke korral lendub see atmosfääri.

Tänu sadu kordi väiksemale mahule on LNG-d võimalik transportida isoleeritud mahutitega teise maailma otsa, kusjuures transpordi käigus tekkivad kaod ei ületa ka pikkade vahemaade puhul enamasti 1-2%-i. Selle teeb võimalikuks eelisoleeritud mahutitega tankerlaevad ning mitmekihiliste mahutitega (sisuliselt termostega) varustatud veoautod. LNG hoiustamine toimub samuti isoleeritud mahutites. Gaasi tarbimiseks viiakse LNG gaasilisse olekusse seda soojendades. Hetkel kasutatakse selleks enamasti väliskeskkonda – kas merevees või ümbritsevas välisõhus olevat soojusenergiat. Sama protsess toimub ka Eesti viies LNG lokaalses taasgaasistusjaamas, kus faasi muutuseks vajalik soojusenergia võetakse välisõhult või vajadusel lisakütteallikast. Seega läheb potentsiaalne jahutusenergia kaotsi.

Kui soovida ära kasutada võimalikku LNG jahutusenergiat ja hinnata selle otstarbekust tuleb võrrelda seda hetkel kasutuses olevate jahutusenergia tootmise alternatiividega. Need on reeglina kompressormasinad, mis tarbivad jahutusenergia tootmiseks elektrienergiat ning põhinevad Carnot' pöördringprotsessi tingimustel. Seadmete efektiivsusnäitaja COP sõltub põhiliselt tarvitatava jahutusenergia temperatuurist, võimalikust kondenseerumise temperatuurist, kompressorite tüübist ja kasutatavast külmutusagensist. Mida

madalamatemperatuurilist jahutusenergiat toota, seda väiksemaks muutub seadme COP tegur ehk ühe ühiku elektrienergia kohta toodetakse üha vähem ühikuid jahutusenergiat. Keskmiselt jääb see tegur kompressormasinatele 0°C temperatuuriga jahutusenergia tootmisel 3 juurde, -40°C jahutuse tootmiseks langeb COP aga juba 1 lähedale (eeldatav kondenseerumise temperatuur 40°C).

LNG-st saadava jääkjahutusenergia tööstusele ülekandmiseks tuleb kasutada soojusvaheteid, mille valik sõltub alates külmakandjast, mis selle sees voolab, selle olekufaasist, parameetritest ning lõpetades keskkonna temperatuuride vahega. Soojusvahetite tootjaid on palju ning vastavalt projektile on võimalik leida sobivat tüüpi ning piisava soojusvahetuspinnaga tooted.

LNG-st saadava jahutusenergia hindamiseks on oluline selle aurustumissoojus ehk kui palju jahutusenergiat eraldub faasi muutuse käigus. Samuti ka erisoojus, mille abil on võimalik kirjeldada, kui palju energiat on võimalik saada temperatuuride vahest. Aine temperatuuri tõstmisel või langetamisel üle faasimuutuse piirkonna ei muutu protsessi antav energia kogus ja temperatuuri muutus lineaarselt. Ehk faasi muutuse käigus eraldub LNG gaasistamisel juba suur hulk jahutusenergiat ilma, et selle temperatuur oleks tõusnud kõrgemale kui -160°C (atmosfäärirõhul). Töös on arvutused tehtud LNG peamise komponendi metaani kohta, kuna sõltuvalt tootjast on LNG koostis erinev, aga põhiline koostisosa on alati metaan. Vastavalt sellele on metaanil atmosfäärirõhul ja temperatuuril -162°C aurustumissoojus 510,8 kJ/kg kohta ning keskmine erisoojus ~2,12 kJ/kgK kohta. Nende arvude baasil on töös leitud ühest kilogrammist LNG-st eralduv -20°C temperatuuriga jahutusenergia kogus, mis on 0,266 kWh/kg ehk 1 tonni LNG kohta eraldub 226 kWh -20°C temperatuuriga jahutusenergiat. Sellest energia kogusest on 63% saadaval juba faasi muutuse protsessi käigus ning ainult 37% kogu jahutusenergia potentsiaal tuleneb temperatuuri tõstmisel -20°C kraadini (atmosfäärirõhul). Võrreldes aga jahutusenergia kogust kütuses sisalduva soojusenergia kogusega, siis 1 MWh soojuse kohta eraldub LNG-st ~ 16 kWh jahutusenergiat (-20°C, rõhul 1 atmosfäär).

Reaalsemate tulemuste saamiseks, mida oleks võimalik võrrelda, on töös välja arvutatud Saaremaal ja Paides juba töös olevate LNG gaasistusjaamade potentsiaalsed jahutusenergia kogused. Saaremaal on gaasi tarbijateks piimatööstus ja lihakombinaat, mis tarbivad stabiilselt aastas kokku 1200 tonni gaasi, Paides pagaritööstus - 1000 tonni gaasi aastas.

Saaremaal on stabiilse jahutusenergia vajadusega piimatööstus, mis tarbib -5°C jahutusenergiat piima jahutamiseks. Kuna antud tööstuse juures ei ole jahutuseks vajalik temperatuur eriti madal, siis seeläbi saab ära kasutada enamiku LNG-s peituvast jahutusenergia potentsiaalset. Ehk 1200 tonnist LNG-st on Saaremaal võimalik saada ~ 277 MWh jahutusenergiat aastas (aasta keskmine võimsus ~ 31 kW). See on vaid väike osa (5%) kogu tööstuse hetkelisest jahutusvõimsusest. Seega tulevikus hakkaks see vaid toetama juba paigas olevat jahutussüsteemi. Seevastu on ka hetkel töötavad kompressormasinad tänu suhteliselt kõrgele temperatuurile (-5°C) kõrgema efektiivsusteguriga ($\text{COP} = 2,93$) ning tarbivad selle koguse jahutuse tootmiseks ~ 95 MWh elektrienergiat. Potentsiaalne rahaline kokkuhoid oleks ilma kadudeta ~ 11340 eurot aastas. Üheks suurimaks kaoks võib eelduse kohaselt lugeda jahutusenergia ülekandmise kulu tarbijani, ehk gaasistusjaamast tarbijani tuleb rajada 100 m pikkune jahutuse trass. Eelduste kohaselt oleks selle energiakulu aga üsnagi väike ehk eelisoleeritud torusid kasutades alla 3%.

Paides tarbib pagaritööstus aastaringsest suures koguses jahutusenergiat, kuna jahutab toodetud pirukaid sügavkülmas temperatuuril -38°C šokikülmaga. Kompressormasinate jahutusvõimsus on 440 kW ning COP tegur 1,27 ehk üle kahe korra väiksema efektiivsusega kui Saaremaa -5°C jahutust tootvad seadmetel. Aastasest 1000 tonnist LNG-st vabaneb temperatuuril -38°C jahutusenergiat ~ 208 MWh (aasta keskmine võimsus $\sim 23,7$ kW). See on samuti vaid väike osa tööstuse koguvajadusest ($\sim 5\%$) ehk LNG-st tulev jahutusenergia oleks hetkel installeeritud seadmetele vaid toeks ning ei suudaks asendada koguvõimsusi. LNG taasgaasistamisel saadava 208 MWh (temperatuuril -38°C) jahutusenergia koguse tootmiseks kuluks kompressormasinatega ligikaudu 164 MWh elektrienergiat aastas ehk kokkuhoid tuleks ilma kadudeta ~ 19600 eurot aastas. See on $\sim 57\%$ suurem rahaline kokkuhoid kui Saaremaa jaama juures. Seejuures tasub mainida, et Paide puhul arvestatakse kalkulatsioonides kuni -38°C temperatuurini jahutusenergia kasutust ning potentsiaalselt on võimalik kasutada lisaks ära veel väike osa jahutusenergiat kuni 0°C temperatuurini. Nii nagu Saaremaal asub ka Paides jahutusenergia tarbija gaasistusjaamast ~ 100 m kaugusel, milleni on vaja rajada jahutustrass. Antud parameetritega energia edastuseks on eelisoleeritud torudega kadu trassis ligikaudu 5,6% jahutusenergia toodangust.

Esialgsel hinnangul oleks võimalik LNG-st jahutusenergiat üle kanda propüleenglükooli abil, mille tahkumise temperatuur on $\sim -60^{\circ}\text{C}$. Pideva vedeliku ringluse puhul ei saavuta külmakandja selliseid temperatuure ning läbi soojusvahetite on võimalik jahutusenergia

LNG-st tööstustele üle kanda. LNG gaasistusjaamas peab jääma alati valmidus ilma katkestusteta ümber lülitada protsess vana gaasistussüsteemi peale. Nii suudetakse tagada pidev gaasivajadus ja jahutussüsteemi rikke puhul kaitsta soojusvaheteid agensi jäätumise ohu eest.

Seega kummagi jaama kokkuvõtte aastaks peaks rahalises mõttes tulema üle 10000 euro – Saaremaa näitel ~11300 eurot aastaks ning Paides 19600 eurot. Kui võtta investeerimisperioodiks 10 aastast ning arvestada lihttasuvusajaga, siis oleks võimalik piirinvesteeringu väärtus vastavalt 113000 ja 196000 eurot. Nendest arvudest tuleb maha arvestada võimalikud kaod protsessis, mis selguvad täpsema tehnoloogilise lahenduse käigus, kuid hinnanguliselt jäävad 3-6% vahele.

Lisaks majanduslikule kokkuvõtte tekib ka keskkonna kokkuvõtte, sest 1 MWh elektrienergia tootmiseks kulub Eesti energiakandjate kaalumistegurit arvestades 2 MWh primaarenergiat. Samuti võib väita, et iga MWh elektrienergia tootmisel eraldub ligikaudu 1 tonn CO₂ heitmeid. Seega Saaremaa jaama kaudu toodetavast jahutusenergiast oleks võimalik kokku hoida 190 MWh/a jagu primaarenergiat ning ära hoida ~ 95 tonni CO₂ aastaks. Paide gaasistusjaama abil seevastu juba ~ 320 MWh/a jagu primaarenergiat ja ~ 160 tonni CO₂ ühe aasta jooksul. Seda seetõttu, kuna pagaritööstuses toodetav jahutusenergia on temperatuuril -38°C ja jahutusseadmed on nii madalate temperatuuride juures väikese efektiivsusega.

Läbiviidud arvutuste tulemustest saab järeldada, et LNG gaasistusprotsessist tekkival jääkjahutusenergiat on potentsiaali osaleda tööstustes tarbitava jahutusenergia tootmisel. Süsteemi otstarbekus kerkib eriti esile seal, kus on vaja toota eriti madalaid temperatuure, mille juures alternatiivsed jahutusprotsessid on väga suure energiatarbega. Seda oli hästi näha Paide näitel, kus aastane LNG tarbitav kogus oli 16,7% väikesem, aga võimalik saavutatav kokkuvõtte tuleks nii majanduslikult kui ka keskkondlikult suurem kui Saaremaa piimakombinaadil (rahaline kokkuvõtte 74% suurem ja CO₂ heitmete vähendamine ning primaarenergiat kokkuvõtte 68% suurem). Majanduslikult aspektist lähtudes tuleb selgitada välja täpsed süsteemide investeerimismaksumused, mille järgi saab võrrelda seda töös leitud piirinvesteeringutega (investeering, mille korral lihttasuvusaeg moodustab 10 aastat). Ilma kaota oleks piirinvesteering Saaremaa LNG jaama korral 11300 eurot ja Paide LNG jaamal 196000 eurot. Nende abil saab leida projekti tasuvusaja.

Tuleb silmas pidada seda, et läbi taoliste projektide täidetakse ka Euroopa direktiivides esitatud plaane. Maailmas aastaks kokku toodetud LNG gaasistamisel eralduva jahutusenergia abil oleks

teoreetiliselt võimalik kokku hoida 2,5 kordne terve Eesti elektrienergia tarve. LNG gaasistamisel tekkiva jääkenergia arvelt liigub maailm energiatõhusama majanduse suunas, saavutab primaarenergia kokkuhoiu ning vähendab CO₂ heitmeid.

Kirjandus

- [1] European Commission, „Set-Plan action n°6, Continue efforts to make EU industry less energy intensive and more competitive,“ Brussels, 2016.
- [2] Euroopa Parlament ja Euroopa Liidu Nõukogu, „Direktiiv 2012/27/EL,“ Euroopa Liidu Teataja, 2012.
- [3] Vopak E.O.S. Ltd, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.tallinnlng.com/misonlng/?lang=et>. [Kasutatud 2 Veebruar 2017].
- [4] California Energy Commission, „Significant events LNG history,“ pp 1-2, [Võrgumaterjal]. Available: http://www.energy.ca.gov/lng/documents/SIGNIFICANT_EVENTS_LNG_HISTORY.PDF. [Kasutatud 10 veebruar 2017].
- [5] NVG, [Võrgumaterjal]. Available: <http://naturalgasglobal.com/2015/07/23/technical-requirements-on-lng-quality/>. [Kasutatud 26 jaanuar 2017].
- [6] International Gas Union, „World LNG raport,“ pp. 6-15, 2016.
- [7] Shell, „Shell LNG outlook 2017,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.shell.com/energy-and-innovation/natural-gas/liquefied-natural-gas-lng/lng-outlook/_jcr_content/par/textimage_1374226056.stream/1490189885482/516845c6c67687f21ff02bec2d330b97c91840f9ffa9e4348e7b875683215aaf/shell-lng-outlook2017-slidesmaster2017. [Kasutatud 10 märts 2017].
- [8] Jetgas, [Võrgumaterjal]. Available: <https://jetgas.ee/lng/lng/lng-omadused>. [Kasutatud 18 veebruar 2017].
- [9] Jetgas, [Võrgumaterjal]. Available: <https://jetgas.ee/lng/lng/lng-ja-teised-gaaskutused>. [Kasutatud 15 märts 2017].
- [10] Baltigaas, [Võrgumaterjal]. Available: <http://baltigaas.eu/veeldatud-maagaas/>. [Kasutatud 1 märts 2017].

- [11] Jetgas, [Võrgumaterjal]. Available: <https://jetgas.ee/lng/lng-vaartusahel>. [Kasutatud 22 veebruar 2017].
- [12] Eesti Gaasi Liit, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.egl.ee/index.php?page=42>. [Kasutatud 4 märts 2017].
- [13] A. H. A. V. I. K. Andres Siirde, „Tehniline ja majanduslik hinnang vedelkütusel töötavate katlamajade üleviimiseks veeldatud maagaasi kasutamisele,“ TTÜ, Tallinn, 2012.
- [14] Giignl, [Võrgumaterjal]. Available: http://www.giignl.org/sites/default/files/PUBLIC_AREA/About_LNG/4_LNG_Basics/090801publique_lngbasics_lng_1_-_basic_properties_7.2.09_aacomments.pdf. [Kasutatud 15 veebruar 2017].
- [15] Chiyoda-corp, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.chiyoda-corp.com/technology/en/lng/liquefaction.htm>. [Kasutatud 8 märts 2017].
- [16] Saeid Mokhatab, John Y. Mak, Jaleel V. Valappil, David A. Wood, „Handbook of liquefied natural gas“, pp 147-168, Oxford: Elsevier Science, 2013.
- [17] S. Johannesson, „LNG Blue Corridors,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://lngbc.eu/system/files/deliverable_attachments/LNG%20BC%20D%203.2%20Gas%20Quality.pdf. [Kasutatud 4 märts 2017].
- [18] J. M. D. B. Arthur Wellinger, „The biogas handbook“, pp 378-401, Cambridge: Woodhead publishing, 2013.
- [19] D. A. Nicotra, „LNG, a Sustainable Fuel for all Transport Modes,“ pp 10-15, the Natural & bio Gas Vehicle Association, Brussels, 2013.
- [20] Elering Gaas AS, „Võrgugaasi kvaliteedinõuded,“ Elering Gaas AS, 2015.
- [21] M. Hääl, „Alexela ei saa Paldiski LNG terminalile Euroopa Liidust toetust,“ *ärileht.ee*, 2017.
- [22] Alexela group, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.alexela.ee/est/meist/alexela-group>. [Kasutatud 21 märts 2017].



- [23] Jetgas, [Võrgumaterjal]. Available: <https://jetgas.ee/jetgas>. [Kasutatud 20 märts 2017].
- [24] Jetgas OÜ, „Projektide materjalid“.
- [25] L. Kann, „JetGas ehitab Haapsallu LNG-jaama,“ *Lääne Elu*, 19 märts 2016.
- [26] BEST Company, „Brošüür,“ 2016.
- [27] E. S. B. W. B. J. J. Tomczyk, „Refrigeration and Air Conditioning Technology“, pp 20-25; 30-33, Boston, USA: Cengage Learning, 2016.
- [28] Splung, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.splung.com/content/sid/6/page/latentheat>. [Kasutatud 2 märts 2017].
- [29] Gas Encyclopedia, [Võrgumaterjal]. Available: <https://encyclopedia.airliquide.com/methane>. [Kasutatud 22 märts 2017].
- [30] „Engineering toolbox,“ 8 veebruar 2017. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_339.html.
- [31] Eesti Lennuakadeemia, [Võrgumaterjal]. Available: http://www.eava.ee/opiobjektid/mkl/teooria08/11_tehnilise_termodnaamika_misted_ja_protssid.html. [Kasutatud 2 märts 2017].
- [32] Peace Software, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.peacesoftware.de/einigewerte/methan.html>. [Kasutatud 10 märts 2017].
- [33] Engineerigtoolbox, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.engineeringtoolbox.com>. [Kasutatud 4 märts 2017].
- [34] S. Link, Intelligent Energy, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.ttu.ee/public/m/Marek_Vilipuu/FI_doks/taiendusope/7_FAASISIIRD.pdf. [Kasutatud 30 märts 2017].
- [35] O. Mäeküla, Soojuspumbad. Loengukonspekt (käsikiri).
- [36] R. Albri, „Külmatehnika“ I osa, pp 58-61, Tallinn: Eesti Mereakadeemia, 2011.

- [37] „Soojusvahetid,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://data.vk.edu.ee/RDPR/RDPR61/Soojusgeneraatorid/Loeng%208,9,10%20Soojusvahetid.pdf>. [Kasutatud 2 aprill 2017].
- [38] K. Thulukkanam, Heat exchanger desing handbook, pp 16-25, USA: CRC Press, 2013.
- [39] Tranter, „Product catalogue,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.tranter.com/literature/products/platecoil-brochure-pcc-6.pdf>. [Kasutatud 5 aprill 2017].
- [40] Tranter, „Plate and shell product catalogue,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.tranter.com/literature/products/welded-products-brochure.pdf>.
- [41] C. C. A Franco, „Thermodynamic and heat transfer analysis of LNG energy recovery for power production,“ pp. 2-8, 2014.
- [42] J. Uiga, „Energiatalgud,“ 3 aprill 2017. [Võrgumaterjal]. Available: https://energiatalgud.ee/index.php?title=Elektri_hind_1%C3%B5pptarbijale.
- [43] Uponor, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.uponor.ee/~media/countryspecific/estonia/download-center/indoor-climate/lhd/mount-instr/aqua-thermo-quattro-2012.pdf?version=1>. [Kasutatud 3 aprill 2017].
- [44] J. S. R. V. Valdu Suurkask, „Euroopa Parlament ja Euroopa Liidu Nõukogu direktiiv 2012/27/EL,“ Eesti Standardikeskus, Tallinn, 2003.
- [45] Ilmateenistus, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimanormid/ohutemperatuur/>. [Kasutatud 30 märts 2017].
- [46] Viinalass Heivo, Telko Estonia OÜ, „Soojusvahetusvedelikud ehk soojuskandjad,“ 2016.
- [47] T. Peters, „The best use of waste cold from LNG re-gasification - Liquid air as an energy vector,“ pp 1-3, 2016.
- [48] Vabariigi Valitsus, „Energiatõhususe miinimumnõuded,“ *Riigiteataja*, 9 jaanuar 2013.

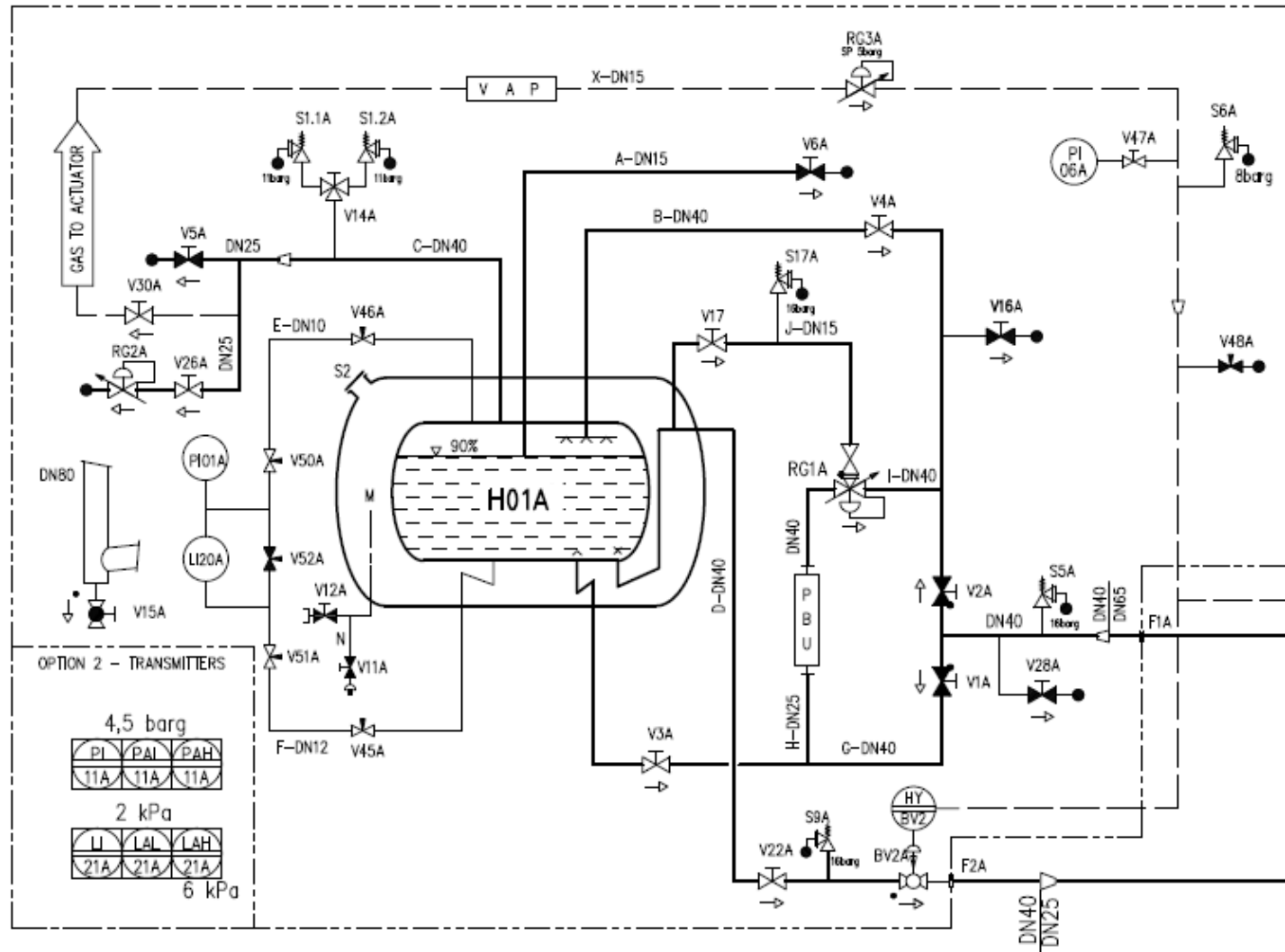
- [49] „Riigi tegevus põlevkivi kasutamise suunamisel,“ *Riigikontrolli aruanne Riigikogule*, pp 21-22, Tallinn, 2014.
- [50] Elering AS, „Elektrienergia tarbimine ja tootmine eestis,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://elering.ee/elektrienergia-tarbimine-ja-tootmine-eestis/>. [Kasutatud 6 aprill 2017].
- [51] M. C. E. A. Roszaka, „Exergy of LNG regasification – possible utilization method. Case study of LNG - ANG coupling,“ pp. 2-8, 2014.

Lisad

L.1. Peterhofi LNG terminalist tankimise väljavõte

QUALITY CERTIFICATE № <u> </u>		<u> </u> G-5 <u> </u>	Date: 26.01.2017	
Liquefied natural fuel gas according to TU 51-03-03-85 Natural gas analysis according to GOST 31371.7-2008 Organization-supplier: LLC Gazprom Gas-Engine Fuel Consignment № G-5/3 Sampling: X250117/2-1 LNG sample is picked out by the handheld sampler.				
Component composition of liquefied natural gas (LNG) consignment:				
Name of the component	Mol. %	Vol. %	Mass. %	
Oxygen	0,004702	0,004709	0,009091	
Carbon dioxide	0,1759	0,1753	0,4677	
Nitrogen	0,2909	0,2914	0,4923	
Ethane	1,871	1,86	3,398	
Propane	0,3143	0,3098	0,8374	
I-butane	0,06173	0,06007	0,2168	
N-butane	0,05408	0,05248	0,1899	
Neopentane	0,001712	0,001646	0,007465	
I-pentane	0,01155	0,01103	0,05034	
N-pentane	0,008555	0,008102	0,03729	
C6+(N-hexane)	0,01748	0,0161	0,09103	
Sum:	2,811909	2,790637	5,797316	
Estimated value of methane:	97,188091	97,209363	94,202684	
Calculation of physico-chemical parameters according to GOST 31369-2008 and ISO 6976-2005:				
The calculation parameters: Temperature measurement: 20°C Pressure measurement: 101,325 kPa				
Physico-chemical characteristic of gas:				
Rate:	100			
Air density 20 ⁰ , кг/м3:	1,2041			
Molar information of methane	density, kg/m ³	0,6669		
	condensability factor	0,998		
Relative gas density with regard to the air:	0,5724			
Wobbe number:	the lowest, kc/m ³	10751,9		
	the highest kc/m ³	11926,2		
Calorific value	the lowest	MJ/m ³	34,06	kc/m ³
	the highest	MJ/m ³	37,78	kc/m ³
Gas density with regard to the standard conditions, kg/m ³	0,6924			
Condensability factor with regard to the standard conditions:	0,998			
Temperature of LNG, °C= -135 Pressure of LNG, kg/cm ² = 5,9 Density of LNG, kg/m ³ = 377				
Chief Operation Department OPK LNG AGFCs		 A.I. Piskunov		
Engineer of laboratory		 N.G. Abrosimova		

L.2. Paide LNG mahuti skemaatiline eskiis



L.3. Ettevõtte Chart Industries pakutavate mahutite tüübid ja andmed

Mudel	Ühenduse suurus	Väline pind [m ²]	Kaal [kg]	Pikkus [mm]	Laius [m]	Kõrgus [mm]	Nimivõimsus [Nm ³ /tunnis]				Nimi- võimsus [kg/tunnis] CO ₂
							LIN (Lämmastik)	LOX (Hapnik)	LAR (Argoon)	LNG	
SG25HF	DN25	18	70	570	570	3860	63	59	74	51	47
SG35HF	DN25	27	98	830	570	3860	94	89	118	77	70
SG50HF	DN25	36	125	1130	570	3860	125	118	156	101	94
SG70HF	DN25	54	184	1210	900	3860	188	177	235	152	141
SG95HF	DN25	72	234	1210	1210	3860	250	236	313	203	187
SG110HF	DN25	81	263	1210	900	5410	281	265	351	228	211
SG140HF	DN25	108	345	1210	1210	5410	374	353	468	304	280
SG180HF	DN25	135	424	1210	1510	5410	466	440	583	378	350
SG216HF	DN50	162	526	1840	1440	5690	559	527	659	453	419
SG270HF	DN50	202	646	1840	1740	5690	695	656	869	564	521
SG320HF	DN50	243	767	1840	2050	5700	834	787	1043	677	626
SG360HF	DN50	270	857	1890	1740	7200	925	873	1156	751	694
SG430HF	DN50	324	1018	1890	2050	7200	1105	1042	1381	896	830
56500HF	DN50	378	1175	1890	2350	7200	1285	1212	1606	1042	965
SG580HF	DN50	431	1338	1890	2580	7200	1464	1381	1830	1188	1097
SG670HF	DN50	503	1547	2500	2280	7200	1701	1605	2126	1380	1275
SG770HF	DN50	575	1758	2500	2580	7200	1936	1826	2420	1570	1451
SG860HF	DN50	647	1969	2500	2890	7200	2169	2046	2711	1760	1626
SG1150HF - DH	DN80	863	2792	2550	2580	10520	2856	2695	3369	2318	2140
SG1300HF - DH	DN80	971	3116	2550	2880	10520	3190	3009	3988	2588	2392
SG1500HF - DH	DN100	1150	3672	2550	2590	13570	3742	3530	4678	3036	2802
SG1700HF - DH	DN100	1294	4114	2550	2890	13570	4174	3938	5218	3387	3125

L.4. Atmosfäärirõhul oleva metaani erisoojuse ja tiheduse muutus sõltuvalt temperatuurist

Temperatuur	Erisoojus	Tihedus
°C	Erisoojus [kJ/kgK]	Tihedus [kg/m³]
-175	3,398	441,48
-170	3,426	434,54
-165	3,457	427,44
-162	3,144	424,14
-161	1,866	1,794
-160	1,982	1,794
-155	2,184	1,707
-150	2,165	1,632
-145	2,152	1,563
-140	2,141	1,501
-135	2,132	1,443
-130	2,125	1,390
-125	2,120	1,341
-120	2,116	1,295
-115	2,112	1,253
-110	2,109	1,213
-105	2,107	1,175
-100	2,106	1,141
-95	2,105	1,108
-90	2,104	1,077
-85	2,105	1,048
-80	2,105	1,021
-75	2,106	0,994
-70	2,107	0,969
-65	2,109	0,945
-60	2,112	0,923
-55	2,115	0,901
-50	2,118	0,881
-45	2,122	0,861
-40	2,127	0,842
-35	2,131	0,824
-30	2,137	0,807
-25	2,143	0,791
-20	2,150	0,775
-15	2,157	0,760
-10	2,164	0,745
-5	2,173	0,731
0	2,181	0,718
10	2,200	0,692
20	2,221	0,668
30	2,243	0,646

L.5. Uponor torustiku dimensioneerimine

Temperatuurimuutus							Vooluhulk	Toru tüüp Δp. v	Toru tüüp Δp. v	Toru tüüp Δp. v
Δθ = 10 K	Δθ = 15 K	Δθ = 20 K	Δθ = 25 K	Δθ = 30 K	Δθ = 35 K	Δθ = 40 K				
10 kW	15 kW	20 kW	25 kW	30 kW	35 kW	40 kW	860 kg/h	25/20,4 0,3016 kPa/m 0,740 m/s	32/26,2 0,0909 kPa/m 0,449 m/s	40/32,6 0,0319 kPa/m 0,290 m/s
20 kW	30 kW	40 kW	50 kW	60 kW	70 kW	80 kW	1720 kg/h	32/26,2 0,3157 kPa/m 0,897 m/s	40/32,6 0,1106 kPa/m 0,579 m/s	50/40,8 0,0377 kPa/m 0,370 m/s
30 kW	45 kW	60 kW	75 kW	90 kW	105 kW	120 kW	2581 kg/h	32/26,2 0,6553 kPa/m 1,346 m/s	40/32,6 0,2294 kPa/m 0,869 m/s	50/40,8 0,0782 kPa/m 0,555 m/s
40 kW	60 kW	80 kW	100 kW	120 kW	140 kW	160 kW	3441 kg/h	40/32,6 0,3853 kPa/m 1,159 m/s	50/40,8 0,1312 kPa/m 0,740 m/s	63/51,4 0,0433 kPa/m 0,466 m/s
50 kW	75 kW	100 kW	125 kW	150 kW	175 kW	200 kW	4301 kg/h	50/40,8 0,1961 kPa/m 0,925 m/s	63/51,4 0,0647 kPa/m 0,583 m/s	75/61,4 0,0276 kPa/m 0,408 m/s
60 kW	90 kW	120 kW	150 kW	180 kW	210 kW	240 kW	5161 kg/h	50/40,8 0,2725 kPa/m 1,110 m/s	63/51,4 0,0899 kPa/m 0,699 m/s	75/61,4 0,0383 kPa/m 0,490 m/s
70 kW	105 kW	140 kW	175 kW	210 kW	245 kW	280 kW	6022 kg/h	50/40,8 0,3599 kPa/m 1,295 m/s	63/51,4 0,1186 kPa/m 0,816 m/s	75/61,4 0,0505 kPa/m 0,572 m/s
80 kW	120 kW	160 kW	200 kW	240 kW	280 kW	320 kW	6882 kg/h	63/51,4 0,1510 kPa/m 0,932 m/s	75/61,4 0,0643 kPa/m 0,653 m/s	90/73,6 0,0269 kPa/m 0,455 m/s
90 kW	135 kW	180 kW	225 kW	270 kW	315 kW	360 kW	7742 kg/h	63/51,4 0,1867 kPa/m 1,049 m/s	75/61,4 0,0795 kPa/m 0,735 m/s	90/73,6 0,0333 kPa/m 0,512 m/s
100 kW	150 kW	200 kW	250 kW	300 kW	350 kW	400 kW	8602 kg/h	63/51,4 0,2259 kPa/m 1,165 m/s	75/61,4 0,0961 kPa/m 0,817 m/s	90/73,6 0,0402 kPa/m 0,568 m/s