

Opinnäytetyö (AMK)

energia- ja ympäristötekniikka

2022

Ville Partanen

KRYOGEENISTEN LÄMMÖNERISTEIDEN VERTAILU

- Tyhjiö-, typpikaasu- ja Cryogel® Z-lämpöeriste

Ville Partanen

KRYOGEENISTEN LÄMMÖNERISTEIDEN VERTAILU

- Tyhjiö-, typpikaasu- ja Cryogel® Z -lämmöneriste

Tämän opinnäytetyön aiheena oli vertailla kolmea eri lämmöneristettä kryogeenisissä sovellutuksissa käytännön kokeilla, joita varten oli rakennettu kaksi koekappaletta. Toimeksiantaja on aikaisemmin arvioinut teoreettisesti lämmöneristeiden suorituskykyä, mutta varsinkin tyhjiöeristeen lämmönsiirtymislaskelmat eivät ole olleet luotettavia, joten teoreettisten tarkastelun lisäksi haluttiin suorittaa käytännön kokeet.

Kokeissa koekappaleet kylmennettiin nestemäisellä tyypellä kryogeeniin lämpötiloihin, jonka jälkeen mitattiin eristeiden pintalämpötilaa ja nestemäisen typen haihtumista. Työssä on myös pohdittu näiden kolmen eri eristeen hyötyjä ja haittoja laivateollisuudessa.

Vertailtaviksi eristeiksi on valittu tyhjiö-, typpikaasu- ja Cryogel® Z -eristeet, jotka ovat pääasiassa käytössä Meyer Turun telakalla rakennettavissa LNG:tä (Liquified Natural Gas) polttoaineena käyttävien risteilijäaluksien LNG-putkiston lämmöneristeenä.

Testien perusteella Cryogel® Z -eriste toimi kryogeenisissä olosuhteissa parhaiten, mutta tyhjiöeristeeseen verrattuna sillä ei ollut merkittävää eroa. Typpikaasu ei toiminut lämmöneristeenä ollenkaan ja oli kolmesta vertailtavasta eristeestä selvästi huonoin.

ASIASANAT:

LNG, nesteytetty maakaasu, lämmöneriste, kryogeniikka.

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Energy and Environmental Engineering

2022 | 36 pages, 4 appendices

Ville Partanen

COMPARISON OF CRYOGENIC THERMAL INSULATIONS

- Vacuum, nitrogen gas and Cryogel® Z thermal insulation

The subject of this thesis was to compare three different thermal insulation materials in cryogenic applications in practical experiments for which two prototypes were built. The commissioner of the thesis had theoretically evaluated the performance of the thermal insulations earlier, but the calculations, especially with vacuum insulation, have not been reliable. For this reason, in addition to the theoretical review, a practical experiment was performed.

In the experiments prototypes were cooled down to cryogenic temperatures where the surface temperature of the insulations and evaporation of liquid nitrogen were measured from prototypes. Also, advantages and disadvantages of these three insulation materials for the ship industry were considered in this thesis.

The three selected thermal insulation materials chosen were vacuum, nitrogen gas and Cryogel® Z. These materials are primarily used for LNG (Liquefied Natural Gas) pipe insulation at the Meyer Turku shipyard for cruise ships powered by LNG.

The result from the experiment was that Cryogel® Z insulation worked best in cryogenic circumstances. However, compared to vacuum insulation Cryogel did not have a significant advantage. Nitrogen gas insulation clearly performed the worst and did not work as a thermal insulation at all.

KEYWORDS:

LNG, liquefied natural gas, thermal insulation, cryogenics

SISÄLTÖ

SANASTO	6
1 JOHDANTO	7
2 VERTAILTAVAT KRYOGEENISET ERISTEET	9
2.1 Tyhjiöeriste	9
2.2 Typpikaasu	10
2.3 Cryogel® Z	11
3 LAITTEISTO	13
3.1 Koekappaleet	13
3.2 Mittausmenetelmät ja mittausolosuhteet	16
4 TEOREETTINEN TARKASTELU	17
4.1 Tyhjiö	19
4.2 Cryogel® Z	20
4.3 Typpikaasu	20
5 KOKEEN TULOKSET	22
6 YHTEENVETO	34
LÄHTEET	36

LIITTEET

- Liite 1. Cryogel® Z –eristetty koekappale.
- Liite 2. Tyhjiö- ja typpikaasueristetty koekappale.
- Liite 3. Cryogel Datasheet.
- Liite 4. Cryogel Datasheet.

KUVAT

Kuva 1. Meyer Turun telakka (Meyer Turku 2021a)	7
Kuva 2 Cryogel® Z –lämmöneriste (Aerogel Technologies 2021)	12

Kuva 3 Koekappale tyhjiö- ja typpikaasueristeelle	13
Kuva 4 Tyhjiö- ja typpikaasueristetty koekappale	14
Kuva 5 AF Flex support, sisäputken kannake (Alternative Fuel Pipe Solutions 2015)	14
Kuva 6 Koekappale Cryogel® Z -lämmöneristeelle	15
Kuva 7 Cryogel® Z –lämpöeristetty koekappale	15
Kuva 8 Tyhjiöeristetty putki. Vasen kuva kokeen aikana ja oikea 25 minuuttia tyhjiön vapauttamisen jälkeen	28
Kuva 9 Cryogel® Z -eristetty putki kokeen aikana	29
Kuva 10 Typpikaasueristetty putki kokeen aikana	29
Kuva 11 Lämpökamerakuva tyhjiöeristetystä koekappaleesta, jossa kylmin kohta on kappaleen yläpäässä, jossa ei ole eristystä	30
Kuva 12 Tyhjiöeristetyn kappaleen kylmin kohta näkyy kuvassa sinisellä merkillä	30
Kuva 13 Tyhjiöeristetyn kappaleen sisäputken kannakkeet erottui lämpökameralla selvästi heti kokeen alettua	31
Kuva 14 Tyhjiön vapauttamisen jälkeen kappale oli kauttaaltaan jäässä	31
Kuva 15 Cryogel® Z –eristetty kappale kokeen aikana	32
Kuva 16 Cryogel® Z kappaleessa oli tehty eristyksen asennusvaiheessa liitosvirhe, jossa eriste kerrokset olivat asennettu päittäin kun kerrokset olisi pitänyt asentaa limittäin lämpövuodon minimoimiseksi	32
Kuva 17 Typpikaasueristetty kappale kokeen aikana	33
Kuva 18 Typpikaasueristetty kappale kokeen aikana	33

KUVIOT

Kuvio 1 Eristeiden pintalämpötilojen vertailu	23
Kuvio 2 Nestemäisen typen haihtuminen koekappaleista	24

TAULUKOT

Taulukko 1 Mitatut eristeiden pintalämpötilat	23
Taulukko 2 Mitattut nestemäisen typen haihtumismäärät	25
Taulukko 3 Mitattu nestemäisen typen haihtumisnopeus	25

SANASTO

Bunkraus	laivan polttoainetankkien tankkaus
FERU	floating engine room unit
LNG	liquified natural gas (nesteytetty maakaasu)
\dot{Q}	lämpövirta (W)
T	lämpötila (C°)
R	lämpöresistanssi (K/W)
k	lämmönjohtavuus (W/mK)
L	pituus (m)
α	lämmönsiirtokerroin (W/m ² K)
A	pinta-ala (m ²)
Q_h	höyrystymislämpö (kJ)
E	energian määrä (kJ)
r	tyypen ominaishöyrystymislämpö (kJ/kg)
m	massa (kg)
ρ	tiheys (kg/m ³)
V	tilavuus (m ³)

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä vertaillaan kryogeenisten eristeiden lämmönläpäisy eroja LNG-putkistossa. Tarkastelun kohteeksi on valittu tyhjiö-, typpi- ja Cryogel® Z -eristeet.

LNG (liquefied natural gas) on nesteytettyä maakaasua, jonka lämpötila ilmakehän paineessa on alle -162 °C ja sen tilavuus nesteytettynä on 600 kertaa pienempi kuin kaasun olomuodossa. LNG:n huomattavasti pienempi tilavuus mahdollistaa maakaasun tehokkaan kuljetuksen ja varastoinnin kohteisiin, joihin ei ole taloudellisesti kannattavaa rakentaa omaa kaasuputkea ja kaasun käsittelylaitosta. LNG:tä käytetään suurien polttomoottorien polttoaineena ja etenkin meriliikenteessä LNG:n käyttö tulee lisääntymään kiristyneiden päästörajoitusten vuoksi. (Aronietis & Sys & Van Hassel & Vanelander 2016, s. 4)

LNG-putkien eristys on tärkeää, jotta mahdollisimman vähän LNG:tä höyrystyisi bunkrauksen ja muun putkistossa tapahtuvan siirron yhteydessä ja, että kondensoituminen ja jään muodostuminen saataisiin minimoitua. Eristämätön putki on myös turvallisuusriski, koska se voi aiheuttaa paljaalle iholle palovamman kaltaisia vakavia palovammoja.

Toimeksiantajan esittely

Opinnäytetyö on tehty yhteistyössä Meyer Turun telakan kanssa, jonka tilauskirjassa kuusi risteilyalusta seitsemästä käyttää polttoaineenaan LNG:tä.



Kuva 1. Meyer Turun telakka (Meyer Turku 2021a)

Meyer Turku Oy on Turussa sijaitseva suurien risteilyaluksien, autolauttojen ja erikoisaluksien erikoistunut telakka, jonka omistaa saksalainen perheyhtiö Meyer Werft. Meyer

Werft omistaa Turun lisäksi myös kaksi muuta telakkaa saksassa, Meyer Werft Papenburgissa ja Neptun Werft Rostockissa. Papenburgissa on erikoistuttu vastaaviin aluksiin kuin Turussa, kun taas Rostockin telakalla, joka on pienempi kuin sisartelakkansa, valmistetaan jokiristeilijöitä, erikoisaluksia ja konehuoneloikoja (FERU, floating engine room unit), jotka uittamalla kuljetetaan Papenburgin ja Turun telakalla rakennettaviin risteilijäaluksiin. (Meyer Turku 2021b)

Turun telakka perustettiin vuonna 1737 ja sen omistaja on vaihtunut lukuisia kertoja vuosien kuluessa. Meyer Werft osti Turun telakan vuonna 2014 korealaiselta laivarakennusyhtiö STX:ltä. Omistajavaihdon jälkeen telakka on saanut lukuisia risteilijätalauksia monilta eri varustamoilta ja tällä hetkellä tilauskirja ulottuu vuoteen 2025. Parhailaan laiturissa varustellaan Costa Smeralda risteilijäalusta, joka luovutetaan Costa Cruisesille marraskuun puolella välissä ja rakennusaltaassa on meneillään Mardi Gras-risteilijän rungon koonti, joka luovutetaan Carnival Cruise Lines-varustamolle vuoden 2020 elokuussa. (Meyer Turku 2021c)

Meyer Turulla on kolme tytäryhtiötä, hyttitehdas Piikkiö Works Oy, laiva- ja offshore-alan suunnitteluyritys ENG'nD Oy sekä Shipbuilding Completion Oy, joka on laivan julkisten tilojen kokonaistoimittaja. (Meyer Turku 2021d)

Meyer Turulla on omia työntekijöitä ja tytäryhtiöiden työntekijöitä yhteensä yli 2000 ja tuhansia muita alihankkijoita, työllistämisvaikutus koko Suomessa on yli 30 000 (Meyer Turku 2021e). Telakan taloudelliset vaikutukset ovat merkittävät varsinkin Varsinais-Suomessa, mutta myös koko Suomessa. Vuonna 2018 Meyer Turun ja sen suorien toimittajayritysten yhteenlaskettu liikevaihto on noin 1,9 miljardia euroa (Grönlund & Ranti & Karvonen 2020).

2 VERTAILTAVAT KRYOGEENISET ERISTEET

Lämpöeristeiden tärkein tarkoitus on minimoida lämmönsiirtymistä eristettävästä kappaleesta ympäröivään tilaan. Kryogeenisillä eristeillä halutaan estää lämmönsiirtyminen ympäröivästä tilasta eristettävään kappaleeseen ja kosteuden tiivistyminen eristeen sisälle ja kappaleen pintaan. Eristeellä vähennetään myös tahatonta jään muodostumista ja paleltumavammojen riskiä, jotka ihminen voi saada koskettaessa paljaalla iholla erittäin kylmää kappaletta.

Ilmankosteuden tiivistyminen on kylmäteristyksissä aina ongelma, koska kun kappaleen lämpötila on alle kastepisteen, kondensoituu ilmankosteus kappaleen pinnalle. Eristeisiin kosteus kulkeutuu konvektion ja diffuusion avulla. Konvektiossa ilmapirran mukana kosteus kulkeutuu eristeeseen raoista ja reikien kautta, kun taas diffuusiosta ilman kosteus liikkuu vesihöyryinä kahden eri tilan osapaine- tai kosteuspitoisuserojen seurauksena. Ilman korkeampi kosteuspitoisuus pyrkii liikkumaan kohti matalampaa kosteuspitoisuutta tasoittaen pitoisuudet ja jos liikkuvan vesihöyry lämpötila laskee alle kastepisteen, kondensoituu se vedeksi. Ilmankosteuden kondensoitumisen ei ole ongelma tyhjiö- eikä typikaasueristeissä, koska eristeen uloin kerros on täysin ilmatiivis, mutta Cryogel® Z-eristeen uloin kerros ei ole itsessään ilmatiivis vaan kondensoitumista minimoidaan tiivistämällä kaikki liitokset, reiät ja raot erillisillä höyrysuluilla. Höyrysuluilla eristeiden tiivistäminen ei ole ikinä täydellisesti ilmatiivis ratkaisu ilman erittäin korkealuokkaista asennusta. (Bernhoff & al. 2014)

2.1 Tyhjiöeriste

Tyhjiöeristetyt putket ovat kaksoisseinäputkia, putket koostuvat ulkoputkesta, jossa virtaa varsinainen tuote ja ulkoputkesta, joiden välitila ali paineistetaan tyhjiöksi muuttamaan Pascaliin. Tyhjiöeriste on erinomainen kryogeeninen eriste, koska kuten muissa eristeissä, tyhjiössä lämpö siirtyy vain säteilemällä, kun taas muissa eristeissä lämpö voi siirtyä myös johtumalla ja konvektiolla.

Tyhjiöeristeellä etuihin kuuluu: erittäin matala lämmönläpäisykerroin, koska lämpö voi liikkua tyhjiössä vain säteilemällä, sisä- ja ulkoputken väliin ei kondensoidu vettä, joka heikentäisi lämmönläpäisykerrointa, hyvällä suunnittelulla ja laadukkaalla rakentamisella tyhjiöeriste kestää koko laitoksen eliniän ajan ja on hyvin huoltovapaa.

Huonoihin puoliin lukeutuu: ulkoputken asentaminen ja hitsaaminen vaativat työntekijöiltä ammattitaitoa ja työ on hidasta ja kallista. Sisä- ja ulkoputken välisen tilan alipaineistus tyhjiöksi voi olla viikkojen työ, riippuen täysin alipaineistettavan tilan tilavuudesta. Jos sisäputkessa on vuoto, voi vuodon löytäminen olla todella vaikea ja työläs prosessi, vaikka putkistoon olisi asennettu tasaisin väliajoin antureita havaitsemaan vuoto sisäputkessa, joudutaan vuotoa paikallistamaan aukaisemalla ulkoputkea sattumanvaraisesta kohdasta, missä anturi hälyttää sisäputken vuodosta. Tämä johtaa todennäköisesti siihen, että ulkoputkea aukaistaan ”turhaan” väärästä kohdasta, joka teettää ylimääräistä työtä. Myös vuoto ulkoputkessa voi olla hankala paikallistaa. Jos vuoto on hyvin pieni, ei vuotoa todennäköisesti löydy, jolloin joudutaan turvautumaan tyhjiöpumppuun, jolla alipaineistetaan välitilaa jatkuvasti. Myös sisä- ja ulkoputken väliin tuleva sisäputken kanake muodostaa kylmäsilan, jossa lämpöhäviöt sekä kondensoituminen ja jäätyminen ovat suuremmat. Yksi turvallisuusriski on, jos sisäputkeen tulee vuoto ja LNG:tä pääsee sisä- ja ulkoputken väliseen tilaan. Vuodon sattuessa tyhjiö imee LNG:n sisäputkesta, kunnes välitilan paine on sama kuin sisäputken. Tämä aiheuttaa sen, että LNG:tä pääsee leviämään laajasti välitilaan ja myös varoventtiililinjoihin (Luukkala, M., henkilökohmainen tiedonanto 15.9.2021).

2.2 Typpikaasu

Typpikaasueristeen rakenne on samanlainen tyhjiöeristeessä, mutta tyhjiön tilalla on 10 baaria typpikaasua. Typpikaasun tarkoitus ei ole toimia tuplaputkessa eristeenä, vaan sen tehtävä on pääasiassa toimia turvallisuuden takeena, jos sisäputkeen tulee vuoto ja LNG:tä pääsee vuotamaan sisä- ja ulkoputken väliseen tilaan. LNG:n syttymisraja on 5–15 % ilmassa, joka tarkoittaa, että kun LNG:tä on ilmassa 0–5 % on seos liian laiha syttyäkseen ja kun LNG:tä on yli 15 % ilmassa on se liian rikas seos syttymään (Coffey Natural Systems 2009). Vuodon sattuessa LNG sekoittuu välitilassa typpikaasuun, joka alentaa LNG:n syttyvyyden todennäköisyyttä. Tästä on hyötyä, jos ulkoputkeen tulee vuoto samanaikaisesti ja LNG:tä pääsee ympäröivään ilmaan, jossa voi olla syttymislähteitä, josta höyrystynyt LNG voi syttyä ja räjähtää.

Typpikaasueristeen hyviä puolia on LNG vuodon sattuessa LNG:n syttyvyysriskin alentuu ja vuodot putkistossa on helppo paikallistaa.

Typyikaasueristeen huono puoli on, että se ei toimi lämpöeristeenä vaan se vaatii erillisen eristekerroksen kaksoisseinäputken päälle, joka nostaa putkiston hintaa merkittävästi verrattuna tyhjiöeristettyyn putkistoon (Luukkala, M. henkilökohtainen tiedonanto 15.9.2021).

2.3 Cryogel® Z

Cryogel® Z –eriste on suunniteltu erityisesti kryogeenisiin lämpötiloihin antamaan parhaimman mahdollisen lämpöeristeen mahdollisimman pienellä painolla ja paksuudella. Eristeen paksuus määritellään aina tapauskohtaisesti ympäröivän ilman lämpötilan ja kosteuden ja eristettävän putken pintalämpötilan mukaan. Toisin kuin tyhjiö- ja typpieristeessä, Cryogel® Z-eristeessä ei tarvita kaksoisseinäputkia, vaan eriste asennetaan suoraan tuotetta siirtävän putken ympärille (Aspen Aerogels 2019a).

Cryogel® Z on aerogeeliä, joka on hyvin huokoista silikaattivaahtoa. Eriste toimitetaan joustavana mattona, jonka toinen sivu on laminoitu PE-muovilla päällystetyllä alumiinifoliolla, jotta veden kondensoituminen eristeeseen olisi mahdollisimman vähäistä. Myös eristeen solut ovat suljettuja, toisin kuin esimerkiksi kivillaeristeessä, joka vähentää ilman kosteuden tiivistymistä eristeen sisälle tai putken pintaan. (Woods 2011)

Cryogel® Z-eristettä käytetään erityisesti kohteissa, joissa on rajoitettu tila eristettävän putkiston tai laitteen ympärillä. Näitä ovat esimerkiksi laivat, avaruusaluukset ja teollisuuslaitokset.



Kuva 2 Cryogel® Z –lämmöneriste (Aerogel Technologies 2021)

Eristettä saa 5 mm ja 10 mm paksuisena, jota asennetaan useita kerroksia putken koon ja tarvittavan lämmöneristyskyvyn mukaan. Vaikka itse eristeessä on höyrysulkukerros ja eristeen solut ovat suljettuja, asennetaan eristeeseen ylimääräinen höyrysulkukalvo, butyyliinauhaa, päällimmäisen Cryogel® Z kerroksen päälle. Butyyliinauha tulee asentaa erittäin huolellisesti, jotta saumat ja liitokset olisivat mahdollisimman ilmatiiviit. Putkistoon tai laitteisiin, jotka toimivat alle -40 °C , asennetaan toinen höyrysulkukalvo kaksi kerrosta päällimmäisen höyrysulkukalvon alle. Butyyliteippi on itseliimautuvaa tiivistenauhaa, jota käytetään erityisesti kryogeenisissä sovelluksissa, mutta myös LVI- ja rakennusteollisuudessa. (Aspen Aerogels 2019b)

Esimerkiksi Meyer Turun telakalla rakennettaviin Costa Cruisen ja Carnival Cruise Linen risteilyaluksien LNG-putkistojen käyttölämpötilat ovat noin -165 °C , joihin asennetaan 6–7 kerrosta Cryogel® Z- eristettä yhteensä 50–70 mm ja kaksi höyrysulkukalvoa.

Cryogel® Z -eristeen etuihin kuuluu: helppo työstettävyys, huoltovapaus, eristeen rikkoutuessa korjaaminen on helppoa, erittäin hyvä lämmönläpäisykerroin (Aspen Aerogels 2019c), materiaalin keveys.

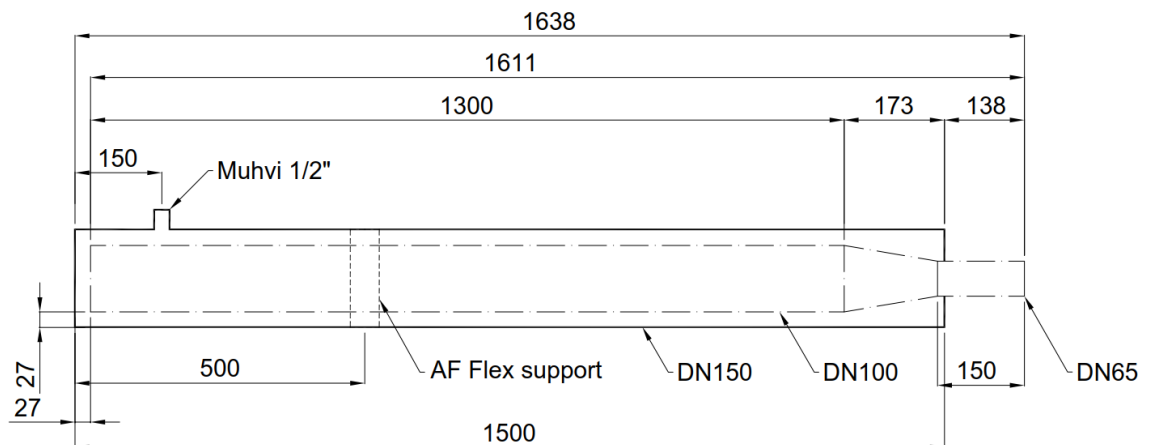
Haittoihin kuuluu eristeen todella korkea hinta ja asennuksen vaativuus. Cryogel® Z ei myöskään sovellu toissijaiseksi suojakerrokseksi LNG vuotoja vastaan, vaan putkisto täytyy rakentaa pääasiassa kaksoiseinämäputkista ellei muita suojarakenteita pysty soveltamaan.

3 MENETELMÄT JA LAITTEISTO

Eristeiden lämmönläpäisykykyä tutkittiin kokeella, jota varten rakennettiin kaksi testikapaletta. Tyhjiö- ja typpikaasueristettä testattiin samalla koekappaleella ja Cryogel-eristettä omalla koekappaleellaan.

Kaikissa kolmessa testissä jäähdytetään sisäputki nestemäisellä typellä noin -195°C asteeseen, jonka jälkeen mitataan eristeen pintalämpötiloja infrapunalämpömittarilla ja lämpökameralla sekä kuinka paljon nestemäistä typpeä on haihtunut.

3.1 Koekappaleet



Kuva 3 Koekappale tyhjiö- ja typpikaasueristeelle

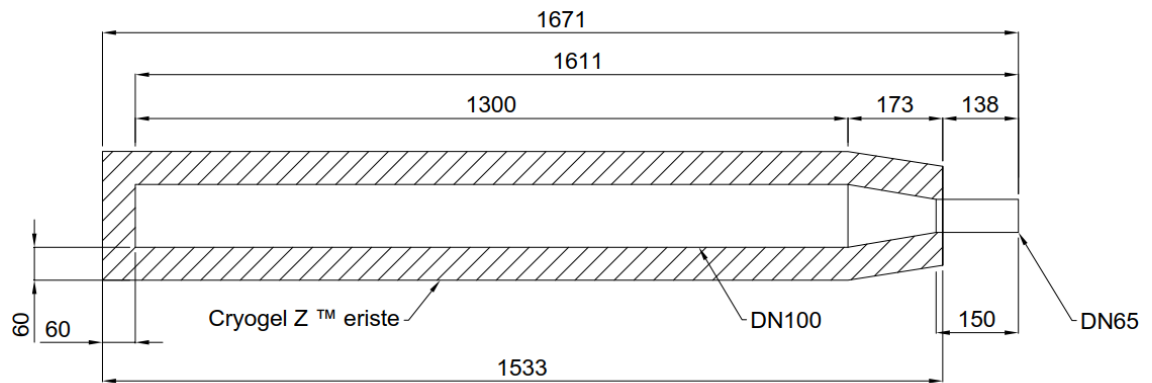
Tyhjiö- ja typpikaasueristeen koekappale koostuu sisä- ja ulkoputkesta. Kuvassa 3 pistekatkoviiva kuvaa sisäputkea ja yhtenäinen viiva ulkoputkea, katkoviiva putken keskellä esittää AF Flex support kannaketta, joka kiinnittää sisäputken ulkoputkeen (kuva 4). Ulkoputkessa on $\frac{1}{2}$ " muhvi, josta pumpataan tyhjiö ja täytetään typellä sisä- ja ulkoputken välinen tila. Sisä- ja ulkoputken välinen tila on ympäriinsä 27 mm.



Kuva 4 Tyhjiö- ja tyypikaasueristetty koekappale



Kuva 5 AF Flex support, sisäputken kannake (Alternative Fuel Pipe Solutions 2015)



Kuva 6 Koekappale Cryogel® Z -lämmöneristeelle

Cryogel® Z -eristeen koekappale sisäputken suhteen sama kuin tyhjiö- ja typpikaa-
sueristeen koekappale, mutta ulkoputki on korvattu Cryogel® Z -eristeellä, jota on ym-
päriinsä 60 mm kerros.



Kuva 7 Cryogel® Z -lämpöeristetty koekappale

3.2 Mittausmenetelmät ja mittausolosuhteet

Eristeiden pintalämpötiloja mitattiin Trifitek TR-47 -infrapunalämpömittarilla ja eristeiden pintaa kuvattiin 3M™ Scott™ X380 -lämpökameralla. Nestemäisen typen haihtumista mitattiin mittaamalla typen nestepinnan mittanauhalla. Kaikki kolme koetta suoritettiin samana päivänä suuressa hallissa. Lämpötila hallin sisällä kokeiden aikana oli 19–20 °C ja suhteellinen ilmankosteus 50 %.

4 TEOREETTINEN TARKASTELU

Eristeiden lämpövirtoja ja pintalämpötiloja tarkasteltiin teoreettisella tasolla niin kuin myös käytännön kokeella.

Koekappaleen lämpövirta lasketaan kaavalla 1

$$\dot{Q} = \frac{T_{\text{ilman lämpötila}} - T_{\text{putken sisälämpötila}}}{R_{\text{total}}}$$

Kaava 1

jossa

\dot{Q}	lämpövirta (W)
$T_{\text{ilman lämpötila}}$	ympäröivän ilman lämpötila (C°)
$T_{\text{putken sisälämpötila}}$	lämpötila putken sisällä (C°)
R_{total}	yhteenlaskettu lämpöresistanssi (K/W)

Putken lämpöresistanssi lasketaan kaavalla 2

$$R_1 = \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{sisäputken ulkosäde}}}{r_{\text{sisäputken sisäsäde}}}\right)}{2\pi \cdot k_{\text{putki}} \cdot L_{\text{putki}}}$$

Kaava 2

jossa

k_{putki}	putken lämmönjohtavuus (W/mK)
L_{putki}	putken pituus (m)

Eristeen lämpöresistanssi lasketaan kaavalla 3

$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_{eristeen\ ulkosäde}}{r_{sisäputken\ ulkosäde}}\right)}{2\pi \cdot k_{eriste} \cdot L_{eriste}}$$

Kaava 3

jossa

r putken/eristeen säde (m)

k_{eriste} Eristeen lämmönjohtavuus (W/mK)

L_{eriste} Eristetyn putken pituus (m)

Lämpöresistanssi putken sisällä lasketaan kaavalla 4

$$R_{\alpha, sisä} = \frac{1}{\alpha_{sisä} \cdot A_{sisä}}$$

Kaava 4

jossa

$\alpha_{sisä}$ lämmönsiirtokerroin putken sisällä (W/m²K)

$A_{sisä}$ pinta-ala putken sisällä (m²)

Lämpöresistanssi putken ulkopinnalla lasketaan kaavalla 5

$$R_{\alpha, ulko} = \frac{1}{\alpha_{ulko} \cdot A_{ulko}}$$

Kaava 5

jossa

α_{ulko} lämmönsiirtokerroin koekappaleen ulkopuolella (W/m²K)

A_{ulko} eristeen pinta-ala (m²)

Lämpöresistanssien summa lasketaan kaavalla 6

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_{\alpha, sisä} + R_{\alpha, ulko}$$

Kaava 6

Eristeen pintalämpötilan ja ilman lämpötilan erotus lasketaan kaavalla 7

$$\Delta T = \dot{Q} \cdot R_{\alpha, ulko}$$

Kaava 7

Eristeen pintalämpötila lasketaan kaavalla 8

$$T_{eristeen\ pintalämpötila} = T_{ilman\ lämpötila} + \Delta T$$

Kaava 8

4.1 Tyhjiö

Tyhjiöeristykseen teoreettinen osuus osoittautui haasteelliseksi, eikä siihen saatu lasketua perinteisillä lämpösäteily kaavoilla luotettavia tuloksia. Pinnan lämpötilaa yritettiin laskea monella eri tavalla ja simulaatioilla, mutta tulokseksi saatiin aina selvästi kylmempi lämpötila, noin -40°C vähemmän, kuin käytännön kokeessa. Tyhjiöeristeen teoreettisessa tarkastelussa päädyttiin käyttämään lämmönjohtavuutena kaasu- ja öljyteollisuudessa käytettäviä tyhjiöeristetyn putkiston lämmönjohtavuutta, koska tyhjiölle ei löytynyt suoraan luotettavaa lämmönjohtavuus arvoja. Tyhjiöeristetyn putkiston toimittajan antamista lämmönjohtavuuksista laskettiin keskiarvo, josta saatiin tulos 0,0303 W/mK (Exceed oilfield equipment 2021), jolla saatiin realistisempia tuloksia kuin laskemalla lämmön siirtyvän säteilynä tyhjiön sisällä.

$$R_1 = 0,000724 \text{ K/W}$$

$$R_2 = 1,2278 \text{ K/W}$$

$$R_3 = 0,000488 \text{ K/W}$$

$$R_{\alpha, sisä} = 0,000798 \text{ K/W}$$

$$R_{\alpha, ulko} = 0,059082 \text{ K/W}$$

$$R_{Total} = 5,3835 \text{ K/W}$$

$$\dot{Q}_{\text{Tyhjiö}} = -164,4 \text{ W}$$

$$\Delta T = -13,8 \text{ °C}$$

$$T_{\text{eristeen pintalämpötila}} = 6,2 \text{ °C}$$

4.2 Cryogel® Z

Cryogel® Z –eristeen lämmönjohtavuutena käytettiin tuotteen valmistajan antamaa lukua, eli 0,014 W/mK.

$$R_1 = 0,0007086 \text{ K/W}$$

$$R_2 = 5,3229 \text{ K/W}$$

$$R_{\alpha, \text{ sisä}} = 0,0007982 \text{ K/W}$$

$$R_{\alpha, \text{ ulko}} = 0,0591 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{Total}} = 5,3835 \text{ K/W}$$

$$\dot{Q}_{\text{Tyhjiö}} = -40,12 \text{ W}$$

$$\Delta T = -2,3 \text{ °C}$$

$$T_{\text{eristeen pintalämpötila}} = 17,6 \text{ °C}$$

4.3 Typpikaasu

Typpikaasun lämmönjohtavuutena käytettiin 0,11 W/mk.

$$R_1 = 0,0007242 \text{ K/W}$$

$$R_2 = 0,3382093 \text{ K/W}$$

$$R_3 = 0,0004876 \text{ K/W}$$

$$R_{\alpha, \text{ sisä}} = 0,0007982 \text{ K/W}$$

$$R_{\alpha, \text{ ulko}} = 0,0840613 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{Total}} = 0,4242806 \text{ K/W}$$

$$\dot{Q}_{\text{Tyhjiö}} = -509,1 \text{ W}$$

$$\Delta T = -42,8 \text{ °C}$$

$$T_{\text{eristeen pintalämpötila}} = -22,9 \text{ °C}$$

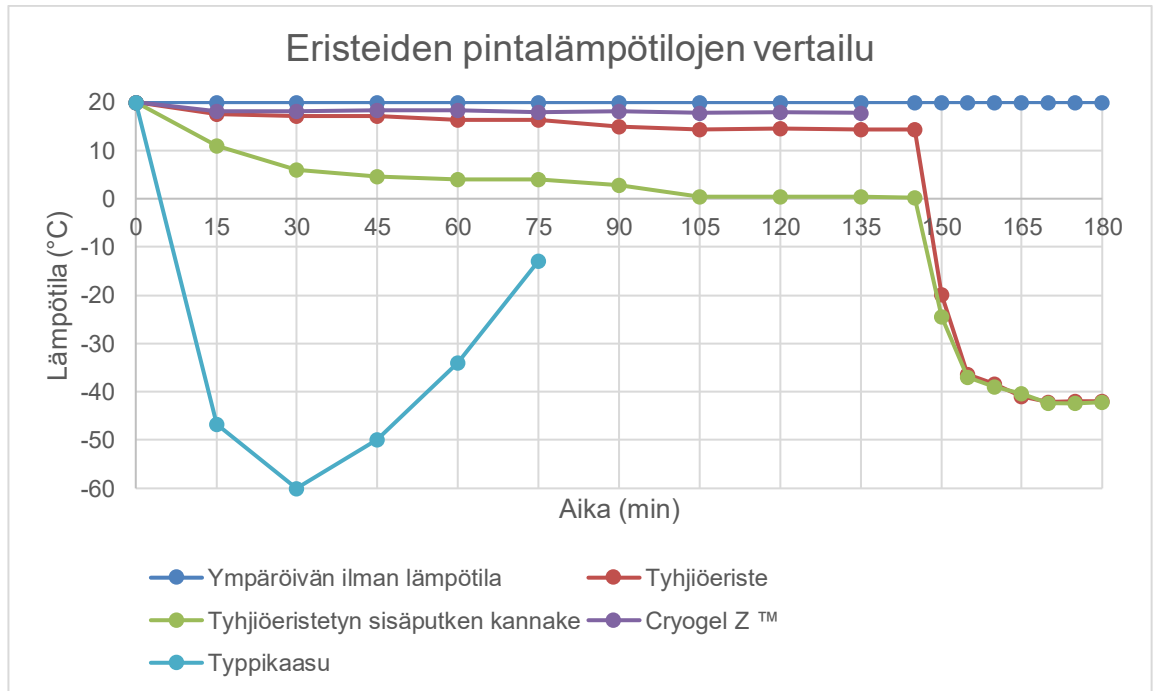
5 KOKEEN TULOKSET

Ensimmäinen koe tehtiin tyhjiöeristetyllä putkella, jolloin kokeen kestoksi määriteltiin 135 minuuttia, koska eristeen pintalämpötila ei ollut tippunut 30 minuuttiin, joten voitiin päätellä, että koekappaleen lämpötila ei siitä tule suuremmissa määrin laskemaan.

Kokeiden perusteella Cryogel® Z eriste oli kolmesta eristeestä paras, jonka pintalämpötila pysyi kokeen ajan noin 18 asteessa ympäröivän ilman lämpötilan ollessa noin 20 °C, kokeen lopussa 135 minuutin jälkeen eristeen pintalämpötila oli 17,8 °C.

Tyhjiöeristeen pintalämpötila 135 minuutin jälkeen lämpötila oli 14,3 astetta ja eristeen pintalämpötila sisäputken kannakkeen kohdalta oli 0 °C, jonka jälkeen tyhjiö vapautettiin ja sisä- ja ulkoputken väliseen tilaan päästettiin ympäröivää ilmaa ja mittauksia otettiin 5 minuutin välein.

Typpikaasu ei eristeenä toiminut lainkaan vaan lämpötila tippui 15 minuutissa -46,8 asteeseen ja 30 minuutin jälkeen lämpötila oli -60 °C, joka oli infrapunalämpömittarin mittausalueen alaraja, tämä tarkoittaa, että todennäköisesti lämpötila oli alhaisempi kuin mittarin lukema. Typpikaasueristyskoe keskeytettiin 75 minuutin jälkeen, koska lähes kaikki nestemäinen typpi oli haihtunut pois koekappaleesta. Kuviosta 1 nähdään, kun lämpötila on käynyt -60 °C, lähtee lämpötila nousemaan kohtalaisen jyrkästi. Ilmiö johtuu siitä, että nestemäistä typpeä oli tähän mennessä jo haihtunut niin paljon, että se ei enää jäähdyttänyt koekappaletta kokonaisvaltaisesti vaan ympäröivän ilman lämpötila lämmitti koekappaletta enemmän kuin nestemäinen typpi kylmensi kappaletta.



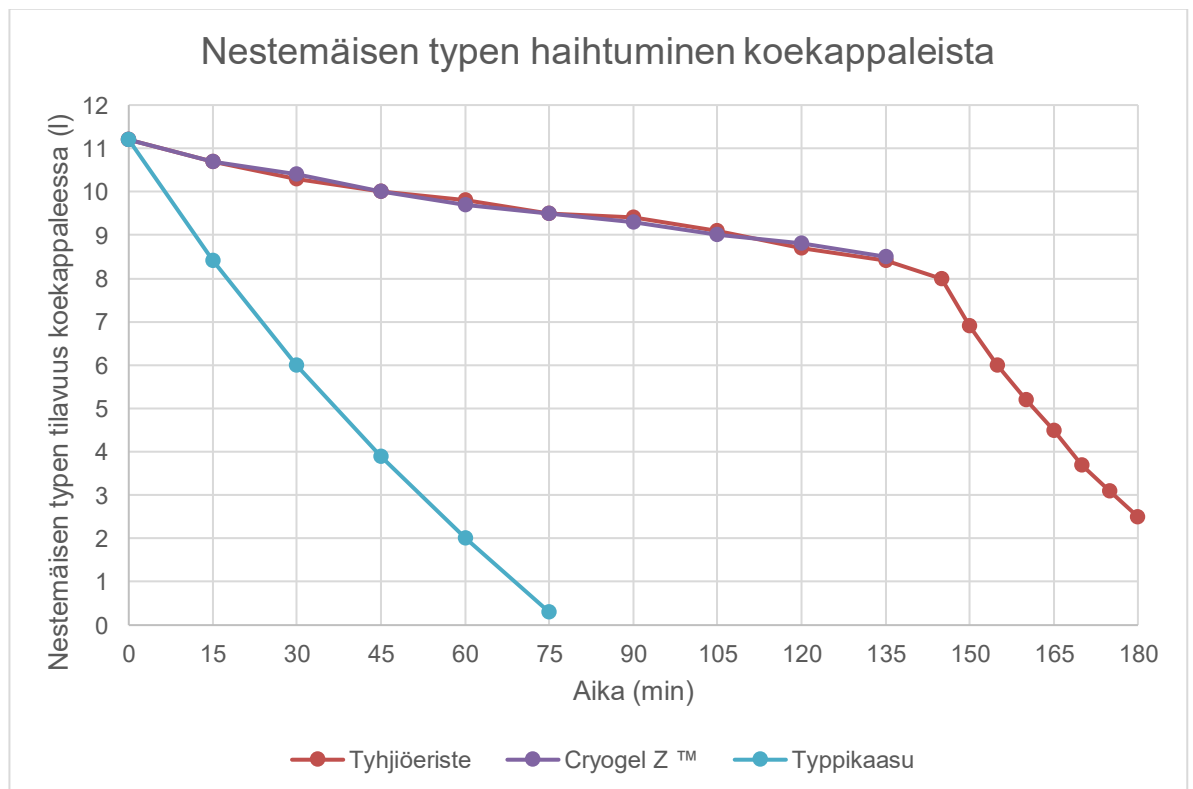
Kuvio 1 Eristeiden pintalämpötilojen vertailu

Taulukko 1 Mitatut eristeiden pintalämpötilat

Eristeiden pintalämpötilat (°C)					
Aika (min)	Ympäröivän ilman lämpötila	Tyhjiöeriste	Tyhjiöeristetyn sisäputken kannake	Cryogel® Z	Typpikaasu
0	20	20	20	20	20
15	20	17,5	10,9	18,1	-46,8
30	20	17,2	6	18,1	-60
45	20	17,1	4,6	18,3	-50
60	20	16,3	4	18,4	-34
75	20	16,3	3,9	18	-13
90	20	15	2,9	18,1	
105	20	14,4	0,5	17,8	
120	20	14,6	0,5	17,9	
135	20	14,4	0,4	17,8	
145	20	14,3	0,3		
150	20	-19,8	-24,5		
155	20	-36,4	-37		
160	20	-38,3	-38,9		
165	20	-41	-40,4		
170	20	-42,1	-42,3		
175	20	-42	-42,4		
180	20	-41,9	-42,1		

Eristeiden pintalämpötilat kokeen aikana nähdään kuviosta 1. Cryogel eristeen pintalämpötila laski ensimmäisen 15 minuutin aikana 20 asteesta noin 18 asteeseen, jossa se pysyi koko kokeen ajan.

Tyhjiöeristeen pintalämpötila tippui 105 minuutissa 14,4 asteeseen, johon lämpötilan laskeminen pysähtyi. Samalla seurattiin sisäputken kannakkeen lämmön johtumista, jota mitattiin seuraamalla pintalämpötilaa kannakkeen kohdalta. Kannakkeen lämpötila laski ensimmäisen 30 minuutin aikana 14 astetta, jonka jälkeen lasku hidastui ja pysähtyi 105 minuutin jälkeen 0,5 asteeseen. 135 minuutin jälkeen eristeen lämpötila oli 14,3 °C ja kannakkeen lämpötila 0,3 astetta. Tämän jälkeen, 145 minuutin kohdalla, tyhjiö sisä- ja ulkoputken välissä vapautettiin ja tila täytettiin ympäröivällä ilmalla. 10 minuutissa eristeen lämpötila laski 50 °C ja kannakkeen 37 astetta. Eristeen ja kannakkeen pintalämpötila asettui noin -42 asteeseen 25 minuuttia tyhjiön vapauttamisen jälkeen.



Kuvio 2 Nestemäisen typen haihtuminen koekappaleista

Taulukko 2 Mitatut nestemäisen typen haihtumismäärät

Typen määrä koekappaleessa (I)			
Aika (min)	Tyhjiöeriste	Cryogel® Z	Typpikaasu
0	11,2	11,2	11,2
15	10,7	10,7	8,4
30	10,3	10,4	6
45	10	10	3,9
60	9,8	9,7	2
75	9,5	9,5	0,3
90	9,4	9,3	
105	9,1	9	
120	8,7	8,8	
135	8,4	8,5	
145	8		
150	6,9		
155	6		
160	5,2		
165	4,5		
170	3,7		
175	3,1		
180	2,5		

Taulukko 3 Mitattu nestemäisen typen haihtumisnopeus

Typen haihtumisnopeus edelliseen mittauspisteeseen verrattuna (I)			
Aika (min)	Tyhjiöeriste	Cryogel® Z	Typpikaasu
0	0	0	0
15	0,5	0,5	2,8
30	0,4	0,3	2,4
45	0,3	0,4	2,1
60	0,2	0,3	1,9
75	0,3	0,2	1,7
90	0,1	0,2	
105	0,3	0,3	
120	0,4	0,2	
135	0,3	0,3	
145	0,4		
150	1,1		
155	0,9		
160	0,8		
165	0,7		
170	0,8		
175	0,6		
180	0,6		

Kuviosta 2 ja taulukoista 2 ja 3 nähdään, että vaikka Cryogel® Z -eristeen pintalämpötila pysyi hieman korkeampana kuin tyhjiöeristeen, ei tyhjiöeristetystä koekappaleesta haihtunut nestemäistä typpeä kuin 1–2 % enemmän ennen tyhjiön vapauttamista.

Tyhjiöeristeellä nestemäisen typen haihtumisnopeus oli kokeen alusta tyhjiön vapauttamiseen saakka 0,0207 l/min, kun taas tyhjiön vapauttamisen jälkeen typen haihtuvuusnopeus oli 0,157 l/min

Cryogel® Z -eristetyllä kappaleella nestemäisen typen haihtuvuus oli 0,02 l/min.

Typpikaasu kokeessa haihtumisnopeus oli 0,145 l/min. Kokeessa nestemäinen typpi haihtui pois kokeen alussa nopeampaa kuin koeen lopussa 75 minuuttia aloittamisen jälkeen, jolloin lähes kaikki nestemäinen typpi oli haihtunut pois ja koe keskeytettiin. Ensimmäisen 15 minuutin aikana nestemäinen typpi haihtui noin 0,19 l/min nopeudella kun viimeisen 15 minuutin aikana typpeä haihtui 0,11 l/min nopeudella.

Haihtumisnopeuksien suuri muuttuvuus, etenkin typpikaasueristeen kanssa, kokeen alkamisesta kokeen loppuun perustuu siihen, että kokeen alussa koekappaleen lämpötila oli sama kuin huoneen lämpötila eli 20 °C. Kun lämpimään kappaleeseen kaadetaan -195 °C nestemäistä typpeä, on lämmönsiirtyminen nopeampaa, koska lämpötilaerot ovat niin suuret, mutta koekappaleen kylmetessä haihtuminen tasautuu.

Nestemäisen typen höyrystymislämpö eri eristeissä lasketaan kaavalla 9

$$Q_h = r * m$$

Kaava 9

jossa

Q_h	Höyrystymislämpö (kJ)
r	typen ominaishöyrystymislämpö (kJ/kg)
m	massa (kg)

Höyrystyneen nestemäisen typen massa koekappaleessa lasketaan kaavalla 10

$$m = \rho * V$$

Kaava 10

jossa

m massa (kg)

ρ nestemäisen typen tiheys -196 °C lämpötilassa, 1 atm (kg/m³)

V tilavuus (m³)

Tyhjiöeristetyn kappaleen höyrystymislämpö

$$m_{\text{tyhjiöeriste}} = 807,4 \text{ kg/m}^3 * 0,0028 \text{ m}^3 = 2,26 \text{ kg}$$

$$Q_h = 195,7 \text{ kJ/kg} * 2,26 \text{ kg} = 442 \text{ kJ}$$

Tyhjiöeristetyn kappaleen höyrystymislämpö tyhjiön vapauttamisen jälkeen

$$m_{\text{tyhjiöeriste vapauttamisen jälkeen}} = 807,4 \text{ kg/m}^3 * 0,0055 \text{ m}^3 = 4,44 \text{ kg}$$

$$Q_h = 195,7 \text{ kJ/kg} * 2,26 \text{ kg} = 868 \text{ kJ}$$

Cryogel® Z –eristetyn kappaleen höyrystymislämpö

$$m_{\text{Cryogel® Z}} = 807,4 \text{ kg/m}^3 * 0,0027 \text{ m}^3 = 2,18 \text{ kg}$$

$$Q_h = 195,7 \text{ kJ/kg} * 2,18 \text{ kg} = 427 \text{ kJ}$$

Typpikaasueristetyn kappaleen höyrystymislämpö

$$m_{\text{Typpikaasu}} = 807,4 \text{ kg/m}^3 * 0,009 \text{ m}^3 = 7,27 \text{ kg}$$

$$Q_h = 195,7 \text{ kJ/kg} * 7,27 \text{ kg} = 1423 \text{ kJ}$$

Edellä laskettuihin höyrystyslämpöihin ei voi luottaa täysin, koska nestemäisen typen haihtumista mitattiin mittanauhalla koekappaleen sisältä kuinka paljon typpeä oli jäljellä, josta sitä ei voinut millintarkasti määrittää. Tulokset ovat enemmän suuntaa antavia, mikä oli työn pääasiallinen tarkoitus.

Eristeiden höyrystyslämpöjen eroista näkee, että tyhjiöeriste lämpesi vain hieman enemmän kuin Cryogel® Z 135 minuutin aikana. Tyhjiön vapauttamisen jälkeen höyrystyslämpö miltein tuplaantui, mutta ei kuitenkaan niin paljoa kuin typpikaasueristeellä, joka oli noin 64% suurempi. Typpikaasueristeen suurempi höyrystyslämpö selittyy sillä, että typpikaasukokeen alussa koekappale oli 20 °C kun taas tyhjiön vapauttamisen jälkeen koekappale oli jo valmiiksi kylmä.



Kuva 8 Tyhjiöeristetty putki. Vasen kuva kokeen aikana ja oikea 25 minuuttia tyhjiön vapauttamisen jälkeen



Kuva 9 Cryogel® Z -eristetty putki kokeen aikana



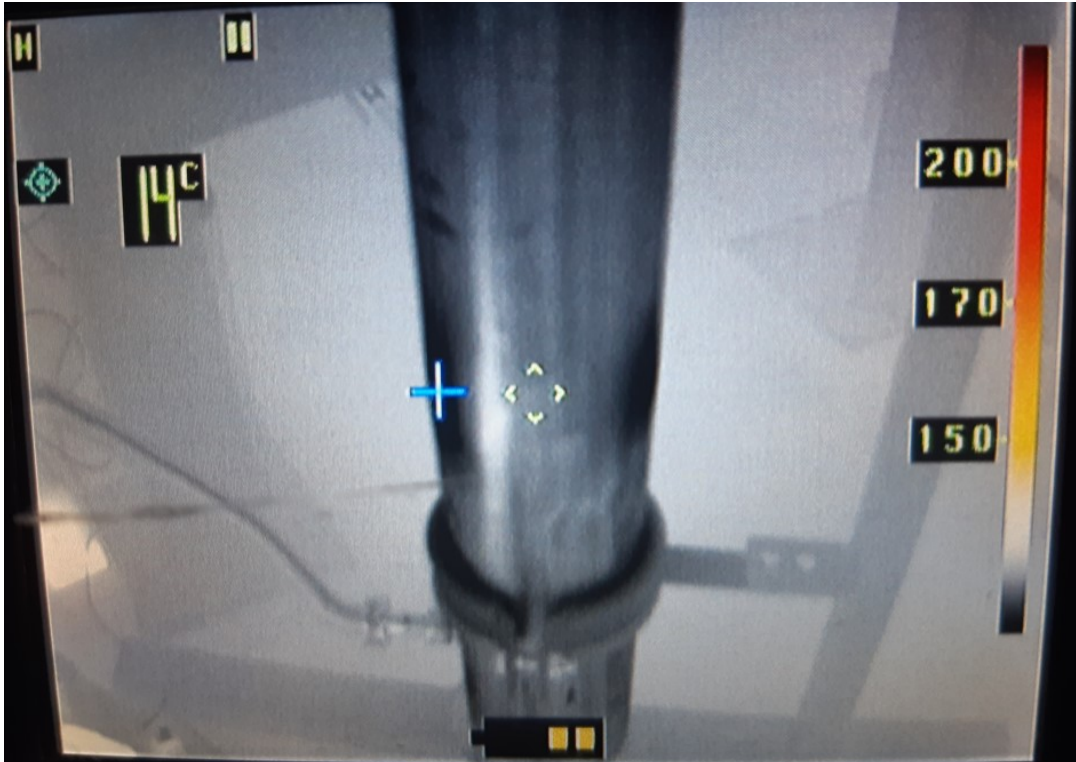
Kuva 10 Typpikaasueristetty putki kokeen aikana



Kuva 11 Lämpökamerakuva tyhjiöeristetyistä koekappaleesta, jossa kylmin kohta on kappaleen yläpäässä, jossa ei ole eristystä



Kuva 12 Tyhjiöeristetyn kappaleen kylmin kohta näkyy kuvassa sinisellä merkillä



Kuva 13 Tyhjiöeristetyn kappaleen sisäputken kannakkeet erottui lämpökameralla selvästi heti kokeen alettua



Kuva 14 Tyhjiön vapauttamisen jälkeen kappale oli kauttaaltaan jäässä



Kuva 15 Cryogel® Z –eristetty kappale kokeen aikana



Kuva 16 Cryogel® Z kappaleessa oli tehty eristyksen asennusvaiheessa liitosvirhe, jossa eriste kerrokset olivat asennettu päittäin kun kerrokset olisi pitänyt asentaa limittäin lämpövuodon minimoimiseksi



Kuva 17 Typpikaasueristetty kappale kokeen aikana



Kuva 18 Typpikaasueristetty kappale kokeen aikana

6 YHTEENVETO

Kokeista nähdään selvästi, että lämmöneristeenä tyypikaasu ei toimi ollenkaan, vaan siitä on pelkästään hyötyä suojaavana kaasuna, jos sisäputken tulee vuoto ja LNG:tä pääsee sisä- ja ulkoputken väliseen tilaan.

Cryogel® Z ja tyhjiöeriste toimivat huomattavasti paremmin kuin tyypikaasueriste. Cryogel toimi eristeenä hieman paremmin kuin tyhjiö, mutta mitään selvää eroa niillä ei ollut. Vakuumieristetyin sisäputken kannakkeen aiheuttama kylmäsilta on haitta, jota ei Cryogel eristeellä toteudu. Lämpöhäviöt kannakkeen kylmäsilan kautta ovat kuitenkin niin pienet, vaikka niitä voi olla satoja putkistossa, ei niistä aiheudu merkittäviä lämpöhäviöitä. Sisäputken kannakkeen aiheuttaman kylmäsilan voi estää laittamalla kannakkeiden kohdalle esimerkiksi solukumieriste palasen, joka ei ole kuitenkaan ideaali tilanne, koska tyhjiöeristeellä on tarkoitus päästä eroon erillisestä eriste kerroksesta putken päällä.

Suurin ero Cryogel® Z ja tyhjiöeristykseen välillä ovat hinta, mutta myös tyhjiöeristeen vuotoriski on otettava huomioon. Kumpikin vaihtoehto on kallis ja työläs tehdä. Cryogel® Z eristeen korkeat kustannukset tulee erityisesti materiaalin erittäin kalliista hinnasta. Cryogeliä käytetäänkin normaalisti vain paikoissa, jossa ylimääräistä tilaa ei ole yhtään ylimääräistä, esimerkiksi laivoissa ja avaruusraketeissa. Muualle esimerkiksi maalle rakennettaviin voima- ja tuotantolaitoksiin, joissa tilaa on enemmän, voidaan käyttää eristeenä muitakin vaihtoehtoja esimerkiksi polyuretaania. Cryogel ei myöskään anna toisijaista suojaa LNG vuotoja vastaan, jota tarvitaan varsinkin laivoissa, jossa -162 °C LNG ei saa päästä kontaktiin laivateräksen kanssa, joka ei kestä kryogeenisiä lämpötiloja vaan haurastuu ja murtuu raskaassa merenkäynnissä. Cryogel® Z -eristeen takia LNG-putket täytyy tehdä tuplaseinäputkena, kuten myös tyhjiöeristetty putki, jolloin voidaan kysyä, että kannattaako Cryogel jättää kokonaan pois ja tehdä linjat tyhjiöeristettynä. Kummatkin vaihtoehdot vaativat putkien asennus- ja hitsaustöitä saman verran työtä, mutta tyhjiöeristeellä säästetään erillisen eristekerroksen asentaminen putkiston päälle. Tyhjiöeristeen suurin riski on mahdollinen vuoto, jota ei saada paikannettua ja korjattua. Silloin täytyy turvautua alipainepumppuun, jolla ylläpidetään haluttua painetta. Todennäköisimmät vuotokohdat tyhjiöeristetyssä putkistossa ovat erilaiset komponentit tai liitoskohdat, joiden riskiä voidaan alentaa laadukkaalla asennustyöllä ja laadukkailla komponenteilla.

Teoreettinen tarkastelun osalta Cryogel® Z –eristeen pintalämpötilan laskelmat osuivat lähelle kokeessa saatuja tuloksia, kun taas tyhjiö- ja typpikaasueristeen osalta laskelmat antoivat selvästi erillaiset tulokset pintalämpötilaksi kuin kokeessa. Tähän syy todennäköisesti se, että Cryogel –eristeelle löytyi luotettava ja tarkka lämmönjohtavuusarvo tuotteen toimittajalta, kun taas tyhjiölle ja typpikaasulle ei löytynyt tarkkoja arvoja.

LÄHTEET

Aerogel Technologies 2021. Viitattu 1.11.2021. <http://www.buyaerogel.com/product/cryogel-z-10-mm-cut-to-size/>

Alternative Fuel Pipe Solutions 2015. Inner pipe support 3inch. Viitattu 8.11.2021. <http://www.afpipes.com/services/inner-pipe-support/>

Aronietis, R. & Sys, C. & Van Hassel, E. & Vanelslander, T. 2016. Forecasting port-level demand for LNG as a ship fuel: The case of the port of Antwerp, Journal of Shipping and Trade (JST), ISSN 2364-4575, SpringerOpen, London, Vol. 1, Iss. 2, pp. 1-22. Viitattu 5.11.2021. <http://dx.doi.org/10.1186/s41072-016-0007-1>

Aspen Aerogels 2019. Cryogel Z Datasheet. Esite. Viitattu 5.11.2021. <https://www.aerogel.com/wp-content/uploads/2021/06/Cryogel-Z-Datasheet-English.pdf>

Bernhoff, P & al. 2014. Principles of cold insulation. Esite. Viitattu 29.10.2021. <https://www.bauindustrie.de/fileadmin/bauindustrie.de/Media/Veroeffentlichungen/TB7.pdf>

Coffey Natural Systems 2009. Viitattu 15.11.2021. https://pnglng.com/media/PNG-LNG-Media/Files/Environment/EIS/eis_attachment01.pdf

Exceed oilfield equipment 2021. Viitattu 10.12.2021. <http://www.exceedoilfield.ca/product/vacuum-insulated-tubing/>

Grönlund, M. & Ranti, T. & Karvonen, T. 2020. Turun telakan ja sen verkoston aluetaloudelliset vaikutukset 2019. Viitattu 5.11.2021. https://www.turku.fi/sites/default/files/atoms/files//turun_telakan_vaikutukset_2019.pdf

Meyer Turku 2021. Telakka. Viitattu 8.11.2021. https://www.meyerturku.fi/fi/meyerturku_com/shipyard/company/about_the_shipyard_1/about_the_shipyard.jsp

Meyer Turku 2021. Yrityksen historia. Viitattu 8.11.2021. https://www.meyerturku.fi/fi/meyerturku_com/shipyard/company/company_history/company_history.jsp

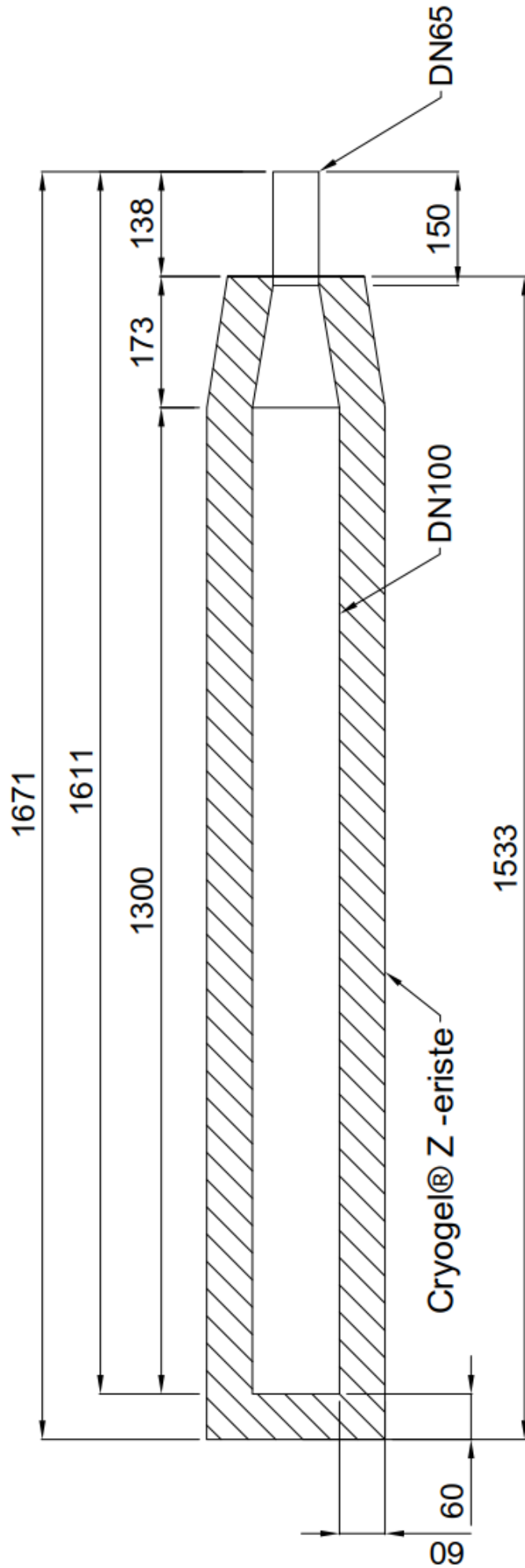
Woods, T. 2011. Aerogels: Thinner, Lighter, Stronger. Verkkoartikkeli. Viitattu 7.11.2021. <https://www.nasa.gov/topics/technology/features/aerogels.html>

Würth 2021. Trifitek tr-47. Viitattu 7.11.2021. <https://eshop.wurth.fi/Kategoriat/Infrapunalaempoe-mittari-TR-47/31066101010205.cyid/3106.cgid/fi/FI/EUR/>

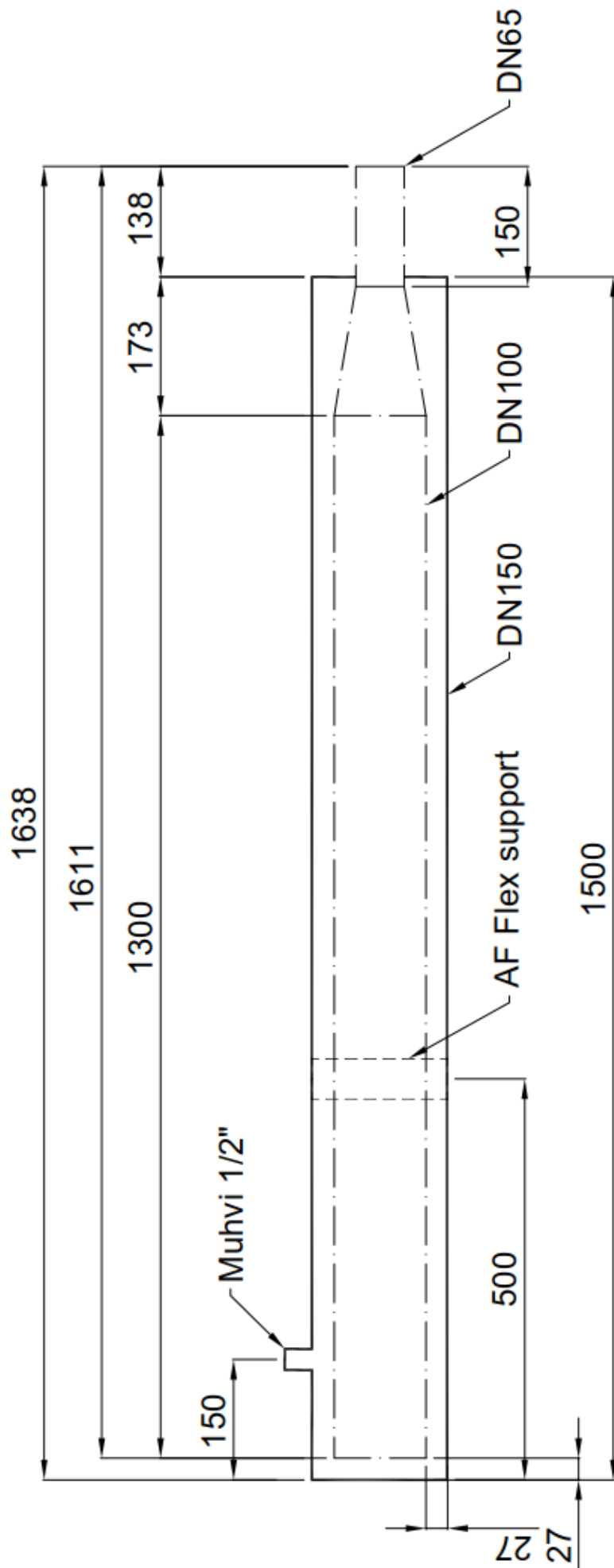
3M 2021. 3M™ Scott™ X380. Viitattu 7.11.2021. https://engage.3m.com/en_3MScott_X-Series

Luukkala, M. 24.9.2021. System engineer. Meyer Turku. Haastattelu. Turku.

Cryogel® Z -eristetty koekappale

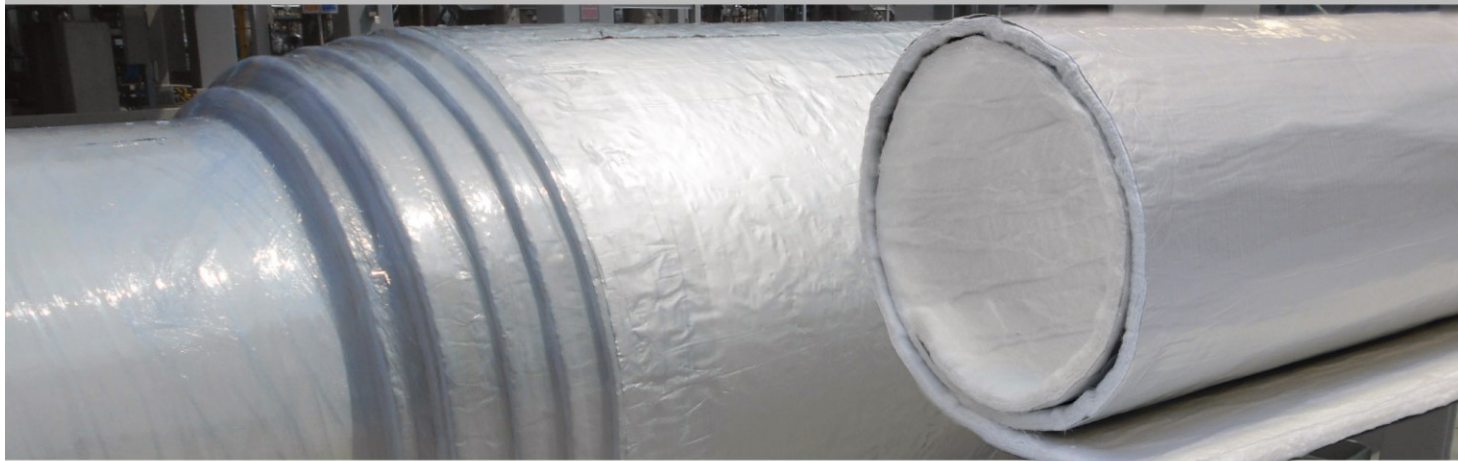


Tyhjiö- ja typpikaasuieristetty koekappale





PRODUCT DATA SHEET



Flexible Aerogel Insulation for Sub-Ambient and Cryogenic Applications

Cryogel® Z flexible aerogel blanket insulation is engineered to deliver maximum thermal protection with minimal weight and thickness. Cryogel Z is composed of a flexible aerogel blanket laminated to a vapor retarder. This powerful combination makes Cryogel Z unmatched in sub-ambient, cold cycling, and cryogenic applications.

Cryogel Z's extremely low thermal conductivity minimizes heat gain and liquid boil-off. Cryogel Z remains flexible, even at cryogenic temperatures, eliminating the need for complex and costly contraction joints, thereby resulting in simple and faster installation. It is designed for long term performance while also withstanding incidental mechanical abuse, leading to continued protection through the life of the asset. Cryogel Z is ideal for faster and safer installations for both maintenance work and new builds.

In addition to being the first choice in cold conservation, Cryogel Z based systems offer acoustic attenuation and protections against cryogenic spill, pool fire, and jet fire. The combination of these safeguards make Cryogel Z ideal for onshore, offshore and marine applications¹.

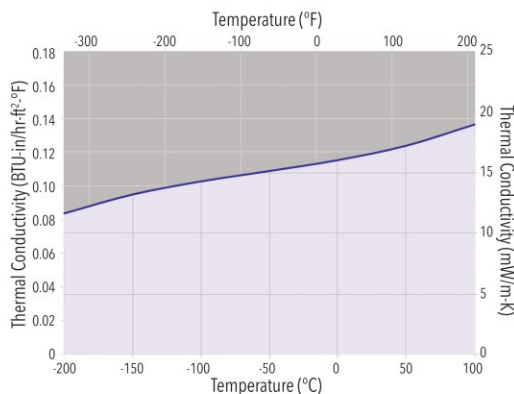
¹ - IMO Compliant Grade is available

THERMAL CONDUCTIVITY †

Tested in accordance with ASTM C177

Mean Temp. °F / °C	k BTU-in/hr-ft ² -°F / mW/m-K
-200 / -129	0.096 / 14
-100 / -73.3	0.10 / 15
0 / -17.8	0.11 / 16
75 / 23.9	0.12 / 17
100 / 37.8	0.12 / 17
200 / 93.3	0.13 / 19

[†]Thermal conductivity measured at a compressive load of 2 psi.



ADVANTAGES

- Extremely low thermal conductivity (k-value) enables thinner designs for improved space efficiency
- Integrated vapor retarder provides redundant protection in an easy-to-install package
- Eliminates the need for contraction joints reducing cost and complexity
- Durable and flexible even at cryogenic temperatures
- Robust performance during construction, transport and operations makes it suitable for pre-insulation and modular builds
- Increased labor productivity and faster installation rates
- Proven in global LNG liquefaction and regasification facilities
- Thermal, acoustic, jet-fire, pool fire, and cryogenic spill protection in a single system



PHYSICAL PROPERTIES OF CRYOGEL® Z

THICKNESS*	0.2 in (5 mm)	0.4 in (10 mm)
ROLL SIZE*	Approx. 1250 sqft; 58 in (1450mm) wide	Approx. 700 sqft; 58 in (1450mm) wide
MAX. USE TEMP.	257°F (125°C)	
COLOR	White	
DENSITY*	10 lb/ft ³ (0.16 g/cc)	
HYDROPHOBIC	Yes	

*Nominal Values

PERFORMANCE OF FLEXIBLE AEROGEL BLANKET

CRYOGEL Z IS PRODUCED FROM FLEXIBLE AEROGEL BLANKET INSULATION THAT COMPLIES WITH ASTM C1728 TYPE I, GRADE 1B AND MEETS THE FOLLOWING REQUIREMENTS

TEST PROCEDURE	PROPERTY	RESULTS
ASTM C165 ¹	Compressive Resistance	≥ 5 psi (34.5 kPa) @ 10% deformation
ASTM C356	Linear Shrinkage Under Soaking Heat	< 2%
ASTM C795	Insulation for Use Over Austenitic Stainless Steel	Pass
ASTM C1101/1101M	Flexibility of Blanket Insulation	Flexible
ASTM C1104/1104M	Water Vapor Sorption	≤ 5% (by weight)
ASTM C1338	Fungal Resistance of Insulation Materials	No Growth
ASTM C1617	Corrosiveness to Steel	Pass
ASTM C1763	Water Absorption by Immersion	Pass
ASTM E84	Surface Burning Characteristics	Flame Spread Index ≤ 25 Smoke Developed Index ≤ 50

[1] Compression resistance measured using a preload of 2 psi.

PERFORMANCE OF VAPOR RETARDER

TEST PROCEDURE	PROPERTY	RESULTS
ASTM E96 - DRY CUP	Water Vapor Transmission	≤ 0.00 Perms

PERFORMANCE OF SYSTEMS INCORPORATING CRYOGEL® Z

The performance of Cryogel Z in cold acoustic service and passive fire protection systems has been evaluated according to the test methods described below. Performance levels achieved in these systems are configuration dependent. Contact Aspen Aerogels technical service for configuration and other details.

- UL 1709 - Rapid Rise Fire Test: Up to 150 min of protection
- OTI-95-634 - Jet Fire Protection: Up to 120 min of protection
- ISO 15665 - Acoustic Insulation for Pipes, Valves, and Flanges: Configurations meeting Class A2, B2, C2, and Shell D2 possible
- IMO Part 2 and 5: Effective July 2019, use only Cryogel Z (IMO grade) for applications requiring compliance with IMO Part 2 and 5. Standard grade Cryogel Z is only appropriate for applications that do not require compliance with IMO Part 2 and 5. Contact Aspen technical service for additional information.

THE AEROGEL ADVANTAGE

Aerogel is a lightweight solid derived from gel in which the liquid component of the gel is replaced with air. The general process of creating aerogel results in a material with extremely low density and the lowest thermal conductivity of any solid. These remarkable properties make aerogel one of the world's most efficient insulating materials. Our patented process integrates this unique aerogel into a fiber-batting to create flexible, resilient, and durable aerogel blankets with superior insulating performance.

WORKING WITH CRYOGEL® Z

Clean, flush, and accurate cutting of Cryogel Z can be achieved using conventional cutting tools such as scissors, tin snips, razor knives, and hot knives. As with all technical insulation materials, appropriate personal protective equipment (PPE) should be worn when handling, cutting and installing Cryogel Z. See SDS/AIS for complete health and safety information. Cryogel Z is designed for use with a properly installed jacketing system. Refer to the Cryogel Z Installation Guide for details.

TECHNICAL SERVICES

Cryogel Z represents the state of the art in cold service asset and process protection, minimizing total installed costs while facilitating long-term operating cost savings. Our Technical Services team offers comprehensive assistance for your project, from initial design and specification, through training and site start up.

MORE INFO



PRODUCT WEB PAGE

Scan with mobile device or go to aerogel.com/cryogel

This product, produced by Aspen Aerogels, Inc. ("ASPEN") is covered by a series of domestic and international patents and licenses. See www.aerogel.com/pat for further details. The information in this datasheet is provided as a convenience and for informational purposes only and obtained from initial type testing by the manufacturer. Product properties are subject to manufacturing variations. This information may contain inaccuracies, errors or omissions. All the products supplied, including all recommendations or suggestions must be evaluated by the user to determine applicability and suitability for any particular use. No guarantee or warranty as to this information, or any product to which it relates, is given or implied here. ASPEN DISCLAIMS ALL WARRANTIES EXPRESSED OR IMPLIED, INCLUDING MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AS TO (i) SUCH INFORMATION, (ii) ANY PRODUCT. In no event is ASPEN responsible for, and ASPEN does not accept and hereby disclaims liability for, any damages whatsoever in connection with the use of or reliance on this information or any product to which it relates.

aspen | aerogels®

Aspen Aerogels, Inc., 30 Forbes Rd, Bldg B, Northborough, MA 01532 USA | Phone: 508.691.1111 | Fax: 508.691.1200 | email: info@aerogel.com | aerogel.com

Aspen Aerogels, Pyrogel, Cryogel, and Spaceloft are registered trademarks of Aspen Aerogels, Inc. ©2019 Aspen Aerogels, Inc.

Rev 8.0 - 7/2019
Replaces 7.0