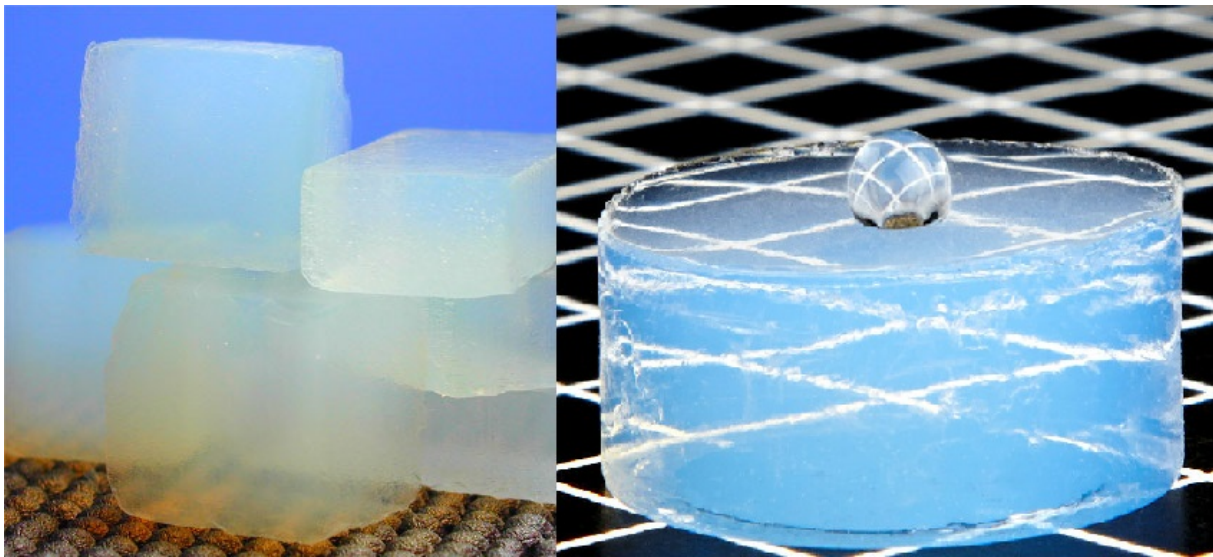




En studie kring applikationer av aerogelmaterial i naturgastankers

Examensarbete inom Sjöingenjörsprogrammet

Mihai Ionescu

Robert Ingvarsson

Institutionen för sjöfart och marin teknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige, 2014

Rapportnr. Si-14/133

RAPPORTNR. Si-14/133

En studie kring applikationer av aerogelmaterial i naturgastankers

Mihai Ionescu
Robert Ingvarsson

Institutionen för sjöfart och marin teknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige, 2014

En studie kring applikationer av aerogelmaterial i naturgastankers

A study on the application of aerogel materials on natural gas tankers

Mihai Ionescu

Robert Ingvarsson

© Mihai Ionescu, 2014.

© Robert Ingvarsson, 2014.

Rapportnr. Si-14/133

Institutionen för sjöfart och marin teknik

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Sverige

Telefon + 46 (0)31-772 1000

Omslag:

[Omslagsfotot illustrerar kisel-aerogeler]

Källa: Omslagsbild på aerogelmaterial 1 & Omslagsbild på aerogelmaterial 2

Tryckt av Chalmers

Göteborg, Sverige, 2014

En studie kring applikationer av aerogelmaterial i naturgastankers

Mihai Ionescu

Robert Ingvarsson

Institutionen för sjöfart och marin teknik

Chalmers tekniska högskola

Sammanfattning

Naturgas är ett energislag i stark expansion just nu. De kommande årtiondena kommer konsumtionen att öka med 60 % till år 2035. Denna ökade konsumtion kommer att bidra till ett ökat behov av att transportera naturgas. Att frakta naturgas ställer stora krav på både material och processer i form av låga temperaturer, korrosion av saltvatten och mekaniska påfrestningar. Att använda aerogelmaterial på naturgastankers skulle kunna ha fördelar gentemot befintliga material som används idag.

Studien ställer frågan om aerogelmaterial kan användas ombord på naturgas-tankfartyg och om de är kan mäta sig med befintliga material. Studiens syfte är att kritiskt undersöka om aerogelmaterial kan användas för isolation och tätningar i rörsystem som används för transport av kondenserad naturgas. Genom en litteraturstudie har egenskaperna för aerogel och de konventionellt använda materialen undersökts.

Resultatet presenteras som en jämförelse mellan aerogelmaterial och befintliga material. När isoleringsmaterial studerades jämfördes filtmaterial med kisel-aerogelpartiklar mot polyuretanskum. Förutom ett lägre värmeledningsvärde så har filtmaterialen en bättre hållfasthet på grund av bättre elasticitet. När tätningarna studerades jämfördes en vanadinaerogel mot PTFE (teflon). Den viktigaste egenskapen för tätningar är elasticitet. Båda materialen har goda elastiska egenskaper vid kryotekniska temperaturer. Resultaten från studien visar på att aerogelmaterial har en stor potential att kunna användas för applikationerna som undersökts.

Nyckelord: aerogel, Cryogel® Z, polyuretanskum, isolering, LNG, rörtätning

Abstract

Today natural gas is an industry in rapid expansion. The coming decades the consumption of natural gas will increase by as much as 60% until year 2035. This increase in consumption will result in large shipping volumes. Shipping natural gas is problematic in the sense that it is transported at very low temperatures. Other problems can be corrosion from seawater and mechanical stresses from sea voyages. This poses some challenges for both materials and processes. The use of aerogel materials could be beneficial to solving these challenges compared to the default materials used today. The study is based around the following question; can aerogel materials be used on natural gas tankers and how do they cope with the conventionally used materials?

The purpose of this study is to determine if aerogel materials can be used for insulation and seals in pipe systems onboard natural gas tankers. This was evaluated by studying relevant literature and publications in order to investigate the properties of aerogel and conventionally used materials.

The result was presented as a comparison between conventional materials and aerogel materials. When insulation was investigated, silica aerogel blanket insulation was compared to polyurethane foams. The blanket material did have a lower heat transfer coefficient and had the advantage of being more resilient to mechanical stresses. When the seal was investigated a vanadium aerogel was compared to PTFE (Teflon). The most important factor in seals is the ability to maintain elasticity despite the low temperatures. In both cases the materials had a sufficient elasticity at cryogenic temperatures. The study has found that aerogel materials definitely have a potential to replace conventional materials in the investigated applications.

Keywords: aerogel, CryogelZ, polyurethane foam, insulation, pipe seal

Förord

Författarna vill börja med att rikta ett stort tack till vår handledare Cecilia Gabrielii som varit behjälplig med snabb feedback och god motivation under studiens gång. Utan hennes stöd och vägledning hade denna studie med stor sannolikhet inte kunnat slutföras.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	i
Abstract	ii
Förord	iii
Innehållsförteckning	iv
Figurförteckning	vi
Tabellförteckning	vi
Ordlista	vii
1. Inledning	1
1.1 Syfte	3
1.2 Frågeställning	3
1.3 Avgränsningar	3
2. Bakgrund Teori	4
2.1 LNG-Fartyg	4
2.2 Isolering	5
2.2.1 Allmänt on isolering	5
2.2.2 Polyuretanskum	6
2.3 Tätningar i rörsystem	8
2.4 Aerogel	10
2.4.1 Allmänt om aerogel	10
2.4.2 Aerogel som isoleringmaterial	11
2.4.3 Aerogel som tätningsmaterial	11
3. Metod	12
3.1 Metodval	12
3.2 Databearbetning och urval	12
4. Resultat	15
4.1. Polyuretanskum - Corafoam®	15
4.2 Aerogel (Cryogel® Z)	17
4.3 Jämförelse av Corafoam® och Cryogel® Z	21
4.4 Förmågan att täta vid kryogeniska förhållanden	23
5. Diskussion	24

5.1 Metoddiskussion.....	24
5.2 Resultatdiskussion.....	24
5.2.1 Isolering.....	24
5.2.2 Tätningar	25
6. Slutsatser	27
Referenser.....	28
Litteratur.....	28
Vetenskapliga artiklar	28
Internetkällor	30

Figurförteckning

Figur 1. Figuren visar volymen som fraktas varje år i miljarder kubikmeter av kondenserad ..	1
Figur 2. Fast Polyuretanskum, slutna celler (Yakushin et. al. 1999).	5
Figur 3. Flexibelt polyuretanskum, öppna celler (Yakushin et. al. 1999).	5
Figur 4. Figuren visar förhållandet mellan inspänningskraft och fluidens påverkan på tätningen (Flitney 2007).	6
Figur 5. Figuren visar framställningen av en aerogel (Sol-Gel technology scheme 2013).	6
Figur 6. Figuren visar den termiska konduktiviteten i förhållande till temperaturen för polyuretanskum (Chung-Jen Tsen* et. al. 1997).	12
Figur 7. Figuren visar isolationstjockleken i millimeter som krävs vid de olika temperaturena för polyuretanskummet Corafoam® (DUNA-Corradini. 2011).	12
Figur 8. Figuren visar den termiska konduktiviteten i förhållande till temperaturen för Cryogel® Z (Aspen aerogel inc. 2012).	12
Figur 9. Värmeledningsförmågan för kiselaerogeler vid varierad densitet (Hümmer et. al. 1993).	12
Figur 10. Figuren visar Tjockleken i millimeter som krävs vid olika temperaturer för Cryogel® Z (Aspen aerogel inc. 2012).	14
Figur 11. Figuren visar Cryogel® Z filter och PIR segment (Aspen aerogel inc. 2012).	15
Figur 12. Figuren visar Värmeflödet genom Cryogel® Z, PIR och Cellulär glas (Aspen aerogel inc. 2012).	15

Tabellförteckning

Tabell 1: Cryogel® Z	9
Tabell 2: Polyuretanskum	9
Tabell 3: Aerogeltätningar	10

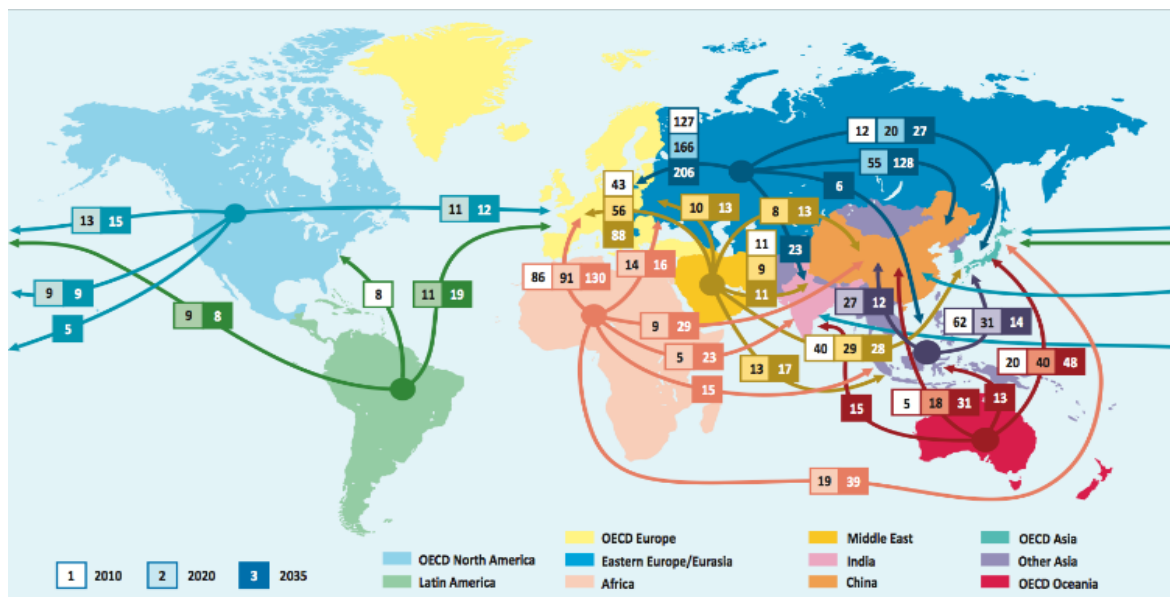
Ordlista

Btu	Enhet för energi. $1 \text{ Btu} \approx 1055,1 \text{ Joule}$.
LNG	Liquified Natural Gas, naturgas i väteskefas
Sol	En sol är ett kolloidalt system av flytande karaktär i vilken de dispergerade partiklarna är varken fasta eller stora molekyler vars dimensioner är i kolloidal intervallet (1-1000nm).
Gel	En gel är ett kolloidalt system av fast karaktär där det spridda ämnet bildar en kontinuerlig enhetlig ram som trängs av ett system bestående av kinetiska enheter som är mindre än kolloidala enheter.
Sol-gel process	Sol-gel processen är en metod för framställning av material. Processen handlar om en övergång från en vätska "sol" till en fast gel-fas.
Agglomerera	Process där partiklar i ett kolloidalt system klumpar ihop sig och bildar en ny partikel.
Kolloid	Är ett system, där ett ämne är finfördelat i ett annat, där det finfördelade ämnets partiklar har åtminstone en storlek mellan en nanometer och en mikrometer.
Meroporös	Material med porstorlek mellan 2-50 nm.
Kryoteknik	Studien av materialegenskaper och processer, oftast under $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

1. Inledning

I en värld med stor efterfrågan på energi, är naturgas något som kommer att expandera under de kommande decennierna. Konsumtionen av naturgas väntas öka från 3,4 miljarder kubikmeter gas år 2011 till nästan 5 miljarder kubikmeter gas år 2035 (International Energy Agency [IEA], 2012, s 126). Samtliga mätningar av gasmängd gjorda av IEA görs vid 15°C och atmosfärstryck (IEA, 2011, s 304). Den främsta ökningen väntas komma i Kina och USA. Tack vare den inhemska gasindustrin i USA har priserna jämnfört med övriga världen sjunkit konsiderabelt. Under juni 2012 var priset på naturgas 2,10 \$/miljon Btu (British Thermal Units) vid Henry Hub, USA, jämnfört med 9,90 \$/miljon Btu i Storbritannien samt 17,40 \$/miljon Btu i nordöstra Asien (IEA, 2012, s 129). Ojämligheten i pris beror främst på att USA satsat hårt på produktion av naturgas från oljeskiffer. För att underlätta jämförelser kan MBtu konverteras till kubikmeter. För att göra detta måste vi anta ett värmeinnehåll per kubikmeter gas. Normalt håller naturgas mellan 38 000 kJ/m³ - 41 400 kJ/m³ (Key world energy statistics 2011, s 60). Om antagandet görs att gasen är exempelvis norsk så har den ett värmevärde på 39 650 kJ/m³. En Btu har värmevärdet 1,0551 kJ, vilket konverterat till MBtu blir 1,0551·10⁶ kJ. För att se hur detta förhåller sig delas MBtu med det specifika värmevärdet per kubikmeter: $\frac{1,0551 \times 10^6}{39600} \approx 26,61 \text{ m}^3/\text{MBtu}$

Denna förväntade utveckling gör att behovet av att exportera gas kommer att öka dramatiskt enligt figur 1 fram tills år 2035. Den internationella handeln med gas förväntas att år 2035 uppnå 1200 miljoner kubikmeter gas, jämfört med 675 miljoner kubikmeter gas år 2010, en förväntad ökning på 80 % (IEA, 2012, s 146).



Figur 1. Figuren visar volymen som fraktas varje år i miljarder kubikmeter av kondenserad naturgas (World energy outlook. 2012, s. 149).

En stor del av transporterna mellan de olika marknaderna sker via sjötransport av gasen i vätskefas. Anledningen till detta är att naturgas i gasform tar ca 600 gånger så stor plats jämfört med naturgas i kondenserat tillstånd (Mcguire & White, 2000). Av ekonomiska anledningar måste därför gasen kondenseras för att göra transporten lönsam. Säkerheten ombord på dessa fartyg måste hålla hög nivå på grund av de potentiella efterverkningarna av

både utsläpp och olyckor. Detta ställer specifika krav på materialen som används i konstruktionen av fartygen. Exempelvis på tätningar i rörsystemet. Materialen måste vara utvalda för att stå emot extremt låga temperaturer, stora temperaturskillnader, korrosion på grund av saltvatten samt mekaniska påfrestningar vid sjöresor.

Naturgas består mestadels av metan och kondenserar vid en temperatur på -162°C . Grundläggande värmelära ger att värmeinläckage i rör och tankar får naturgasen att förgasas. Det är problematiskt att kondensera metan ombord på fartyg då det krävs en stor anläggning som dessutom är svår att driva effektivt. På grund av dessa aspekter är isolering en förutsättning att använda sig av för att minska förlusterna (Alvarez, 2006).

De nuvarande och potentiella materialen ger goda förutsättningar för att kunna möta ovan nämnda utmaningar (L, Hrubesh, 1998). Av dessa skäl har studien riktat sig till att jämföra konventionella material mot aerogelmaterial.

1.1 Syfte

Rapporten redogör för möjligheterna med att använda aerogelmaterial på LNG-fartyg. Syftet är att undersöka huruvida aerogelmaterial är bättre än befintliga material rörande isolation och tätningar av rör som transporterar kondenserad naturgas.

1.2 Frågeställning

Studiens huvudfråga formuleras som:

Kan funktionen av isolation och tätning av rör ombord på LNG-tankfartyg förbättras genom att använda aerogelmaterial?

Till denna huvudfråga följer två underordnade frågor:

- Vad för materialegenskaper är fördelaktiga för de undersökta applikationerna?
- Hur skiljer sig dessa egenskaper mellan de undersökta materialen?

1.3 Avgränsningar

Rapporten kommer enbart beröra rörsystem ombord på fullkylda gastankfartyg vars uppgift är att transportera kondenserad naturgas. Enbart isolations- och tätningsproblematiken behandlas i rapporten. När denna problematik behandlas jämförs valda aerogelmaterial enbart mot en huvudkandidat som har en utbredd användning på området.

Ekonomiska faktorer analyseras inte.

2. Bakgrund Teori

2.1 LNG-Fartyg

För gastankfartyg idag är designen generellt den samma som för produkttankers med kemlaster. Däremot skiljer sig konstruktionen av lasttankar på många punkter på grund av behovet att hålla laster nerkylda och ibland trycksatta (Mcguire & White., 2000, s 57). Därför har branschen en egen standard, som heter "Liquified gas handling principles on ships and in terminals", utöver det som fastställts av IMO (International Maritime Organisation) i International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code).

Fartygstypen för att frakta naturgas är av typen "fully refrigerated ship", där gasen fraktas nerkyld till ca minus 162 °C och gasen är i vätskefas vid atmosfärstryck. Trycket i tankarna får inte överskrida 0,25 bar övertryck (Mcguire et al., 2000, s 11). På grund av värmeinläckage kommer delar av lasten att förångas under sjötransport och därför leds den bort till antingen en ångpanna, en motor där den förbränns eller en återkondenseringsanläggning där gasen kyls ner till vätska och återförs till tanken.

Tankkonstruktionen varierar mellan fartygen, ungefär hälften använder membrantankar medan resten använder självständiga tankar av typ B (Mcguire et al., 2000, s 11). Den primära skillnaden mellan dessa är att membrantankar är byggda direkt på det inre skrovet medan självständiga tankar inte har något stöd av fartygets skrov för att bibehålla sin strukturella integritet. De självständiga tankarna kan även delas upp i sfäriska och prismatiska tankar. Trycket i båda dessa typer av tankar får inte överskrida 0,7 bar övertryck för att undvika strukturella deformationer, men oftast är standard 0.25 bar övertryck.

Det finns flera designaspekter som enbart går att hitta på LNG-tankfartyg. Ifall det finns en återkondenseringsanläggning är den alltid placerat på väderdäck. Kompressorerna är skilda från de drivande motorerna via gassäkra överföringar genom ett avskiljande skott (Maguire et al., 2000, s 70-71). Samtliga lastledningar får inte passera under däck, vilket gör att man inte kan använda ett pump rum, utan enbart dränkbara pumpar i själva lasttankarna samt att lastlinorna måste gå direkt från tanken upp på väderdäck.

Det främsta syftet med transportsystemet ombord är att förflytta lasten, d.v.s. den flytande naturgasen, till och från lasttankarna i fartyget samt att vid behov leda det till förbränning eller återkondensering ombord. För att kunna uppnå detta krävs det några grundläggande systemkomponenter.

Det främsta kravet som ställs på ledningar är materialvalet. Det krävs ett stål som klarar av att bibehålla sin seghet även vid låga temperaturer samt är resistent mot korrosion. På grund av den stora temperaturdifferensen mellan den kylda naturgasen och atmosfären kring röret måste röret isoleras för att undvika att värmeinläckaget blir för stort. Det måste tas god hänsyn vid konstruktionen genom att placera ut expansionsbälgar eller alternativt använda rörsystemets egen geometri, för att tillåta termiska spänningar i rörledningen. Även väl dimensionerade fästningar måste göras för att hantera momentana belastningar i lastlinor på grund av snabba ändringar i flöde (Mcguire et al., 2000, s 75). Det finns filter i rörledningarna för att kunna stoppa eventuella föremål för att kunna följa med in i tanken, exempelvis rost- eller färgflagor.

De specifika typerna av ventiler som oftast används ombord på LNG fartyg är kulventiler, kilslidsventiler, kägelventiler samt vridspjällventiler. Kulventiler har en speciell avluftningskanal från kulan till röret som leder ner mot tanken. Detta för att tillåta att lastrester som fastnat där när ventilen stängts ska kunna expandera utan att förstöra ventilen.

Om rörledningar blir isolerade med lastrester kvar i dem, så ska det finnas en säkerhetsventil som leder ner eventuella lastgaser till tanken. Alternativt kan det dras till någon av utsläppsmasterna (Höga torn vars uppgift är att släppa ut gaser där de kan diffundera utan att påverka fartyg eller besättning) (Mcguire et al., 2000, s 76-79).

Den pumptyp som främst används ombord på LNG-tankfartyg är centrifugalpumpar som är dränkbara. Motorn placeras antingen på själva pumpen (dränkbar pump) eller på däck där man har en drivaxel som går igenom tankdomen (deep well pump) och ner till pumpen. Deep well pumpar är de vanligast förekommande på LNG fartyg. Det finns även exempel där pumpen drivs av hydraulik.

2.2 Isolering

2.2.1 Allmänt om isolering

Värmeisolering är förmågan hos en struktur i ett material att fördröja överföringen av värme. Varje material har en egen specifik grad av värmeöverföring, vanligen anges det som värmeledningsförmåga (k). Vissa material som metaller har ett lågt värmemotstånd och de anses vara bra värmeledare. Andra material såsom polyuretanskum och aerogel har ett högt värmemotstånd så att de klassificeras som goda isolatorer. Alla fasta material med cellulär struktur (dvs. bestående av celler/bubblor) som innesluter luft och andra gaser är vanligen goda isolatorer (DUNA-Corradini, 2011).

Termiska isolatorer kan bestå av fibrös eller cellulärt mineralmaterial såsom glas, kiseldioxid, sten eller slagg; fibrer eller cellulära organiskt material såsom sockerrör, bomull, gummi, trä eller bark, inklusive kork; cellulära organiska plaster såsom polyuretan eller värmereflekterande metaller (Stirna, U. 2011).

De vanligaste typerna av industri- och byggnadsisolering är:

- **Lösfyllning och cement:** Barkisoleringen består av pulver, granulat och knutor som kan hållas eller blåsas in i ihåliga väggar eller andra utrymmen. Isolering cement är ett löst material som, tack vare dess plasticitet och vidhäftning, som erhålls genom att blanda den med vatten, kan sprutas på plats för att fungera som isolering. Både lösfyllningsprodukter och cement är särskilt lämpade för ojämna ytor (2011).
- **Flexibel och halvstyvt:** Material med olika grader av kompressabilitet och flexibilitet. Det finns främst som flexibla filter, men även mera formfasta material som kan hamna under sagda materialtyp. Det finns både organiska och oorganiska typer av isolering i denna kategori (2011).
- **Styvt:** Dessa material är tillgängliga i rektangulära dimensioner och är förformade under tillverkning till standardlängder, bredder och tjocklekar. Isolering för rör och krökta ytor levereras i halva sektioner eller segment med en radie för att passa standardiserade storlekar av rör och slangar (2011).
- **Reflekterande:** Reflekterande material som finns i blad och rullar av enkel- eller flerskikt konstruktion samt i förformade former med inbyggda luftspalter (2011).

– **Formas på plats:** Dessa material är tillgängliga som flytande komponenter som kan hållas eller sprutas på plats för att bilda en styv eller halvstyv skumisolering (2011).

Det är viktigt med en god balans mellan vikt och mekanisk hållfasthet vid ett val av isolationsmaterial. Dessa egenskaper gör det möjligt för materialet att användas i applikationer som kräver en kombination av isolering med lastbärande egenskaper, slaghållfasthet samt enkel installation och underhåll. Isolationsmaterialet skall ge ett gynnsamt förhållande mellan fysikaliska- och mekaniska egenskaper kontra densitet. Densiteten för isoleringsmaterialen beror på deras struktur och uppbyggnad (2011)

Vatten har en värmeledningsförmåga som är 10 till 20 gånger högre än vanligt förekommande isoleringsmaterial. Det är därmed uppenbart hur viktigt det är att hålla vatten ur isoleringen. Närvaron av vatten förutom att orsaka en förlust av isoleringseffekten, leder till en ökning i vikt, risk för korrosion på metallytor och isbildning (2011).

Ett dimensionsstabilt material är ett grundläggande krav för att uppnå ordentlig isolerande prestanda. En storleksändring i det isolerande materialet kan vara reversibel eller irreversibel. Alla material ändrar storlek när de värms upp eller svalnar. Storleksförändringen beror på den kemiska sammansättningen av materialet, vilket innebär att varje material har sin egen värmeutvidgningskoefficient. Denna parameter mäter hur mycket materialet krymper eller expanderar när det utsätts för en temperaturändring. Storleksvariationer på grund av den termiska expansionskoefficienten är reversibla (2011).

2.2.2 Polyuretanskum

Polyuretan, vanligen kallat PU, är ett namn för en grupp av kemikalier kända som uretanpolymerer som består av två huvudsakliga råvaror: polyol och diisocyanat eller en polymerisocyanat. Polyolen är en glykos eller ricinolja och isocyanat är en råoljeprodukt. Polyuretan framställs genom en blandning av dessa två råvaror som formar en matris med lämpliga katalysatorer och tillsatser. Skummet tillverkas genom att det blåses in jämedel. Denna process bildar små bubblor fyllda med jämedel som ger goda isoleringsegenskaper (Treaeger, 1967).

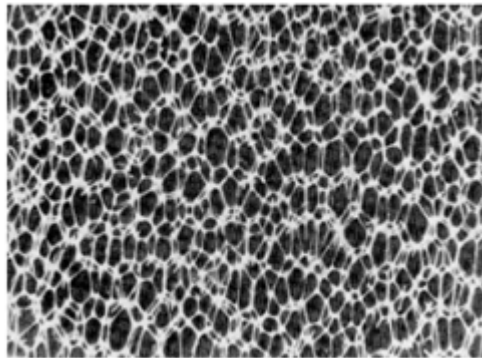
Syntesen av den första polyuretanen utfördes av den tyske kemisten, Otto Bayer (1902-1982). Den industriella och kommersiella framgången för polyuretan inträffade mellan 1945 till 1955 med första relevanta applikationen i området elastomer och skyddande beläggningar. Andra framgångar nåddes av både flexibla skum, med användningsområden såsom vadderade material och madrasser, och hårt skum med deras utmärkta isolerande egenskaper som har varit viktig för användning i hushållsskylskåp (Treaeger, 1967).

Demharter (1998) hävdar att polyuretan skum (PUR) är ett av det mest använda isoleringsmaterialet för kalla- respektive varma processer inklusive transport av LNG i lastlinor. Utifrån det har studien utgått ifrån att polyuretanskum är det konventionella materialet vid isolering av rör.

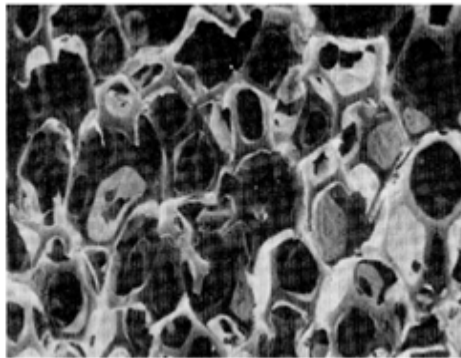
Mångsidigheten hos polyuretan var den drivande kraften bakom att öka forsknings- och industriinvesteringar (Treaeger, 1967).

Polyuretanmatrisen är ansvarig för att hålla alla celler samlade, desto större mängd polymer som håller ihop denna struktur, desto högre densitet. I en kubikmeter skum är det endast 4 % av den totala volymen som upptas av polymerer medan resterande 96 % är fyllda av jäsmedel. Matrisen består av miljontals små celler (Treaeger, 1967).

Både flexibla och styva cellplaster kan framställas med antingen öppna eller slutna celler. Polyuretanskum med en öppen cellstruktur innehåller porer vilka är anslutna till varandra för att bilda ett sammanhängande nätverk, vilket visas i figur 3. En sluten cellstruktur i polyuretanskummet har inget nätverk av anslutna celler (se figur 2) och är därför ett fast skummaterial (Yakushin et. al. 1999).



Figur 2. Fast Polyuretanskum, slutna celler (Yakushin et. al. 1999).



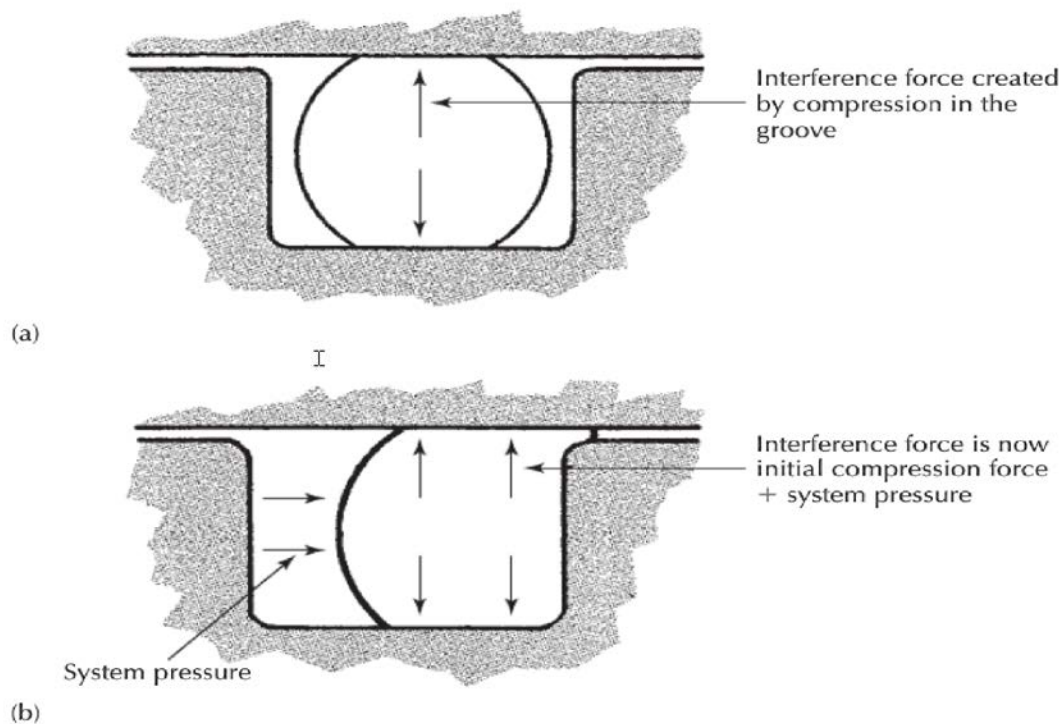
Figur 3. Flexibelt polyuretanskum, öppna celler (Yakushin et. al. 1999).

Fast polyuretanskum har normalt en högre tryckhållfasthet på grund av dess struktur. Denna typ av skum har en högre dimensionsstabilitet, absorberar mindre fukt och har högre hållfasthet i jämförelse med det flexibla polyuretanskummet. Dess struktur ger en hårdare yta, gör den bättre på att absorbera stötar och visar goda isoleringsförmågor. På grund av dessa egenskaper är det fast polyuretanskum som används som isolering av kryogeniska rör (Yakushin et. al. 1999).

DUNA-Corradini är ett företag som tillverkar polyuretanskum. Enligt företaget har de en lång erfarenhet inom tillverkningsindustrin, med en stark inriktning mot produktforskning inom polyuretanskum. Företagets utbud av isoleringsmaterial är anpassade för varma och kalla system. Företagets egna produktionstillverkade polyuretan skum Corafoam®, är det material som används i kryogeniska miljöer. Corafoam® levereras i segment som sedan installeras på plats (DUNA-Corradini 2011).

2.3 Tätningar i rörsystem

En av transportsystemets stora utmaningar, ombord på LNG-tankfartyg, är att bibehålla dess gastäthet vid stora temperaturvariationer som uppstår vid drift. Få material kan bibehålla sin elastiska natur vid så låga temperaturer som krävs för att kondensera naturgas till vätskefas (Flitney, 2007). Samtidigt gör de stora temperaturvariationerna att materialet märkbart kontraherar. Detta måste kompenseras genom större inspänningskrafter vilket ger kraftigare elastiska deformationer vid omgivningstemperaturer. Detta gör att gränserna för elastisk deformation riskerar att överskridas, vilket kan resultera i bestående plastiska deformationer i tätningsmaterialet. Över tid kommer materialet att åldras och om det inte byts kan olyckor uppstå.



Tätningen fungerar genom att en kompression sker av tätningsmaterialet mellan två ytor, där materialet kan deformeras horisontellt. Denna deformation, som kan ses på figur 4, ger upphov till en spänning som påverkar de båda ytorna som materialet är i kontakt med. När tätningen utsätts för exempelvis ett vätsketryck kommer den kraften som är riktad horisontellt i snittet ut från rörets mitt att ytterligare deformera tätningen. Denna andra deformation ger upphov till ytterligare en kraft som liksom den första påverkar de båda ytorna tätningen är i kontakt med. För att tätningen ska vara effektiv måste dessa två spänningar överskrida kraften som fluiden utövar på tätningen (Flitney, 2007)

Vid minskande temperaturer så minskar även elasticitetsmodulen. Detta gör att material som vanligtvis vid rumstemperatur är formbara genomgår en förändring och tappar sin elasticitet. För materialets funktion som tätning är detta förödande eftersom materialet blir skört och bräckligt (Flitney, 2007). Det vanligaste materialet, som tätningar är tillverkade av när flytande naturgas hanteras, vid temperaturer runt $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$, är polytetrafluoreten (PTFE). Det har den stora fördelen att förbli elastiskt till så låga temperaturer som $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Rae & Dattlebaum 2004).

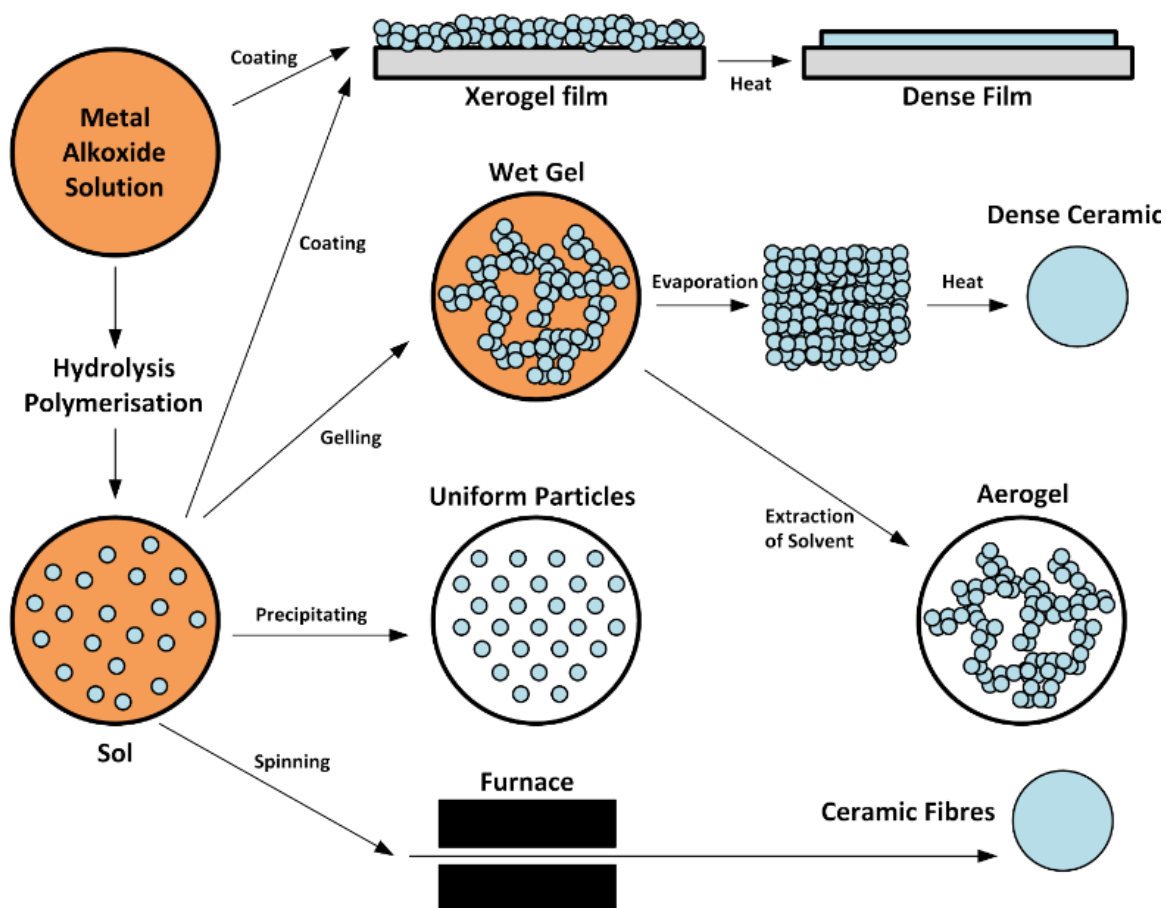
Figur 4. Figuren visar förhållandet mellan inspänningskraft och fluidens påverkan på tätningen (Flitney 2007).

2.4 Aerogel

2.4.1 Allmänt om aerogel

Begreppet aerogel myntades år 1932 av Steven Kistler, som tog fram en metod att genom en superkritisk process bevara strukturen av en våt gel i ett torrt tillstånd. Tidigare använda metoder hade aldrig tidigare kunnat bevara den här strukturen helt intakt. Aerogelmaterial kan tillverkas från en lång rad av olika ämnen. Ett av de främst använda basämnena är kisel, men även järn, kol, tungsten, nitrocellulosa samt gelatin kan förekomma (Pierre, 2011).

Processen för att tillverka aerogelmaterial presenteras nedan i figur 5. Begynnelselösningen för att framställa aerogelmaterial består av ett valt material exempelvis kol eller kisel samt en alkoxid. Med hjälp av hydrolys och polymerisering bildar dessa tillsammans en så kallad Sol-lösning. Sol-lösningen hålls i en form och får stelna. Över tid, eller med hjälp av ett så kallat hjälpämne, kommer partiklarna att agglomerera och bilda en gel. Detta placeras sedan i en vätska. (Pierre, 2011).



Figur 5. Figuren visar framställningen av en aerogel (Sol-Gel technology scheme 2013).

Det är viktigt att gelen får stå i vätskan en tillräckligt lång tid och att den är helt nedsänkt i vätskan. Det är under denna tid som det befintliga nätverket av molekyler stärks, utan detta kan ibland materialet inte vara starkt nog för att klara sig igenom torkningsprocessen.

Nästa steg är att gelen torkas genom superkritisk torkning, d.v.s. att gasen utsätts för tryck och temperaturer där den uppnår ett superkritiskt tillstånd. Tack vare att vätskan blir superkritisk blir det ingen mekanisk påfrestning på cellnätverket, eftersom superkritiska vätskor kan diffundera genom fasta material som gaser, men samtidigt kan lösa ämnen som vätskor.

Fasgränsen mellan gas och vätska försvinner när materialet blir superkritiskt. Slutresultatet blir ett material med hög porositet och en cellstruktur med gasfickor (Pierre, 2011).

2.4.2 Aerogel som isoleringmaterial

Kiselaerogeler har en liten bråkdel av fast kiseloxid, detta medför en lägre ledningsförmåga och därmed blir överföring av värmeenergi mindre. Porerna i Kiselaerogel är öppna och detta tillåter att gaser kan transportera värmeenergi genom aerogelen. Den sista värmetransporten genom kiselaerogel sker genom infraröd strålning och den avgörande faktorn som påverkar överföringen är tjockleken på materialet. Vid låga temperaturer är strålningsdelen av värmeflödet låg, men vid högre temperaturer kommer den största delen av värmeflödet bestå av strålning (Dorcheh, 2008).

Kiselaerogelers höga potential för isolering beror främst på den kristalina strukturen samt materialets höga porositet. Dessa aerogeler består av en tvärbunden inre struktur av kiseldioxidkedjor (SiO_2) med luftfyllda porer. Dessa porer är mikroskopiskt små och har en genomsnittsdiameter mellan 10 och 100 nm. Beroende på tillverkningsmetoden har kiselaerogeler en genomsnittsdiameter mellan 5 och 70 nm som kommer att uppta 85 till 99,8 % av den totala aerogelvolymen (Baetens 2011).

Kiselaerogeler har en bra tryckhållfasthet som klarar en kompression upp till 3 bar men materialet kan bli bräckligt på grund utav en låg draghållfasthet. De svaga hållfasthetsegenskaperna kompenseras i kommersiellt isoleringsmaterial genom att lägga den i en fibermatris (Baetens, 2011). Porositeten med porer i nanometerstorlekar gör aerogelen till ett bra isolerande material.

Aspen aerogel är ett företag i östra USA som tillverkar kiselaerogelbaserade isoleringsmaterial för olika applikationer. Företaget tillverkar olika typer av isoleringsmaterial i flexibla filter tillämpade för varma respektive kalla procedurer. Enligt Aspen aerogel är det Cryogel® Z man använder vid isolering av kryotekniska förhållanden.

2.4.3 Aerogel som tätningsmaterial

Normalt har aerogelmaterial problem att ta upp krafter. Detta på grund av den kristallina struktur som de flesta aerogelmaterial skapar. Den kristallina strukturen gör att materialet har en väldigt begränsad elasticitet. Problemet blir ännu mera uppenbart vid låga temperaturer där elasticiteten sänks ytterligare.

Leventis et al. (2008) har i en studie framställt ett aerogelmaterial som skiljer sig från detta. Detta material är en mesoporös aerogel bestående av vanadin täckt med nano-polymerer, där vanadin-aerogelen består främst av små trådar av vanadin runt 100-200 nm långa och 30-40 nm tjocka. Efter att trådarna behandlats med aminer så förstärks trådarna med en polymer. Polymererna bildar kovalenta bindningar till den mesopörs ytan på vanadintrådarna och binder trådarna samman.

När vanadin-aerogelen undersöktes vid kryotekniska förhållanden så upptäckte Leventis et al. att materialet bibehöll en relativt god elasticitet jämfört med andra aerogelmaterial.

En annan problematik är att mekaniska påfrestningar uppstår även genom kontraktion på grund av temperaturdifferentialer. De Buysser et. al. (2007) har undersökt en aerogel som har en negativ termisk värmeutvidgningskoefficient. Aerogelen består av en zirkonium/volfram-oxid som har keramiska egenskaper.

3. Metod

I detta avsnitt ligger fokus på att presentera tillvägagångssätten i litteraturstudien. Avsnittet behandlar metodval, urval och databearbetning.

3.1 Metodval

För att genomföra studien har vi valt att använda oss av en kvalitativ litteraturstudie som metod där vetenskapliga artiklar söktes ur olika databaser. Høst m.fl. (2010) betraktar de kvalitativa litteraturstudierna som en metod att använda sig av detaljerade redogörelser för det man undersöker behövs. Litteraturstudien har som syfte att ge en grundläggande teoretisk kunskap om de utvalda ämnena samt senare kunna ge möjlighet att genom fördjupade kunskaper dra slutsatser utifrån dessa. På så vis har den kvalitativa litteraturstudien ansetts som lämpligast att använda sig av.

3.2 Databearbetning och urval

Olsson (2004) tar upp vikten med att redovisa hur sökningar i databaser har genomförts för att vidare ge möjlighet åt läsaren att förstå vilken sökstrategi som använts.

Vid sökandet av vetenskapliga artiklar söktes efter relevanta artiklar i databaser där artikelns titel skulle höra till studiens ämne. Därefter undersöktes hur väsentlig artikelns abstract var i förhållande till studien. De artiklar som inte var tillämpliga uteslöts medan de artiklar som uppfattades som givande efter att ha läst abstracten sparades som ett första urval, för att läsas igenom. Slutligen gjordes ett andra urval ur det första urvalet, där lämpliga artiklar att använda i studien behölls medan de artiklar som inte var relevanta eliminerades.

Cryogel® Z är ett material som fortfarande anses som nytt, då de inte funnits på marknaden under lång tid, vilket medförde att vi inte kunde hitta lämpliga vetenskapliga artiklar i databaserna. För att få den data som behövdes till studien har vi utgått ifrån Aspen Aerogels datablad som redogör för materialet Cryogel® Z. Vi är medvetna om att Aspen Aerogel kan ha redogjort för sin produkt på ett inte helt objektivt vis, vilket gjort att vi kritiskt granskat databladet genom att försöka hitta relevant data i vetenskapliga artiklar och jämföra dessa med uppgifter från databladet. Vidare är vi även medvetna om att databladet inte kan mätas med vetenskapliga artiklar. Emellertid är Cryogel® Z som tidigare nämnts ett nytt material som det ännu inte finns forskning på. Vi har även använt oss av datablad för materialet Corafoam®, dock har databladet bedömts utifrån vetenskapliga artiklar för att på så sätt granska databladets innehåll.

Tabellerna nedan redogör för de sökningar som gjorts i databaserna som vidare resulterade till de artiklarna som undersökningen är baserad på.

Tabell 1: Cryogel® Z

Databas	Sökord	Antal träffar	Granskade	Urval 1	Urval 2 Utvalda artiklar
ASM	Aspen aerogel AND/OR Cryogel® Z	0	0	0	0
CRCnetBASE	Aspen aerogel AND/OR Cryogel® Z	54	54	0	0
Scopus	Aspen aerogel AND/OR Cryogel® Z	0	0	0	0
SpringerMaterials	Aspen aerogel AND/OR Cryogel® Z	0	0	0	0
Summon	Aspen aerogel AND cryogel® Z AND thermal insulation	13	13	0	0
Summon	Aerogel blanket AND insulation	832	20	5	2

Tabell 2: Polyuretanskum

Databas	Sökord	Antal träffar	Granskade	Urval 1	Urval 2 Utvalda artiklar
ASM	Rigid Polyurethane foam AND pipeline	1	1	0	0
CRCnetBASE	Rigid Polyurethane foam AND LNG AND pipeline	20	20	9	5
Materials research database	Rigid polyurethane foam AND cryogenic	10	10	6	4
POLYMERSnetBASE	Rigid Polyurethane foam AND cryogenic	5	5	3	2
Summon	Rigid polyurethane foam AND cryogenic AND pipeline AND LNG	389	100	4	2

Tabell 3: Aerogeltätningar

Databas	Sökord	Antal träffar	Granskade	Urval 1	Urval 2 Utvalda artiklar
Summon	sol-gel AND process AND ZrW ₂ O ₈	38	30	4	1
Summon	PTFE AND properties AND compression	12,893	30	5	1
Summon	Vanadia AND Aerogel AND Cryogenic	93	5	2	1

4. Resultat

4.1. Polyuretanskum - Corafoam®

Kaneyoshi (2006) beskriver i sin studie hur densiteter är grunden till materialets egenskaper. Kaneyoshi menar att desto lägre densitet polyuretanskummet har desto sämre hållfasthet och lägre värmeledningsförmåga. Detta på grund av ett reducerat antal polymerer som fungerar som strålningsspridare i materialet. En ökning av densitet resulterar i en ökning av polymerer som vidare medför en ökande värmeledningsförmåga och hållfasthet.

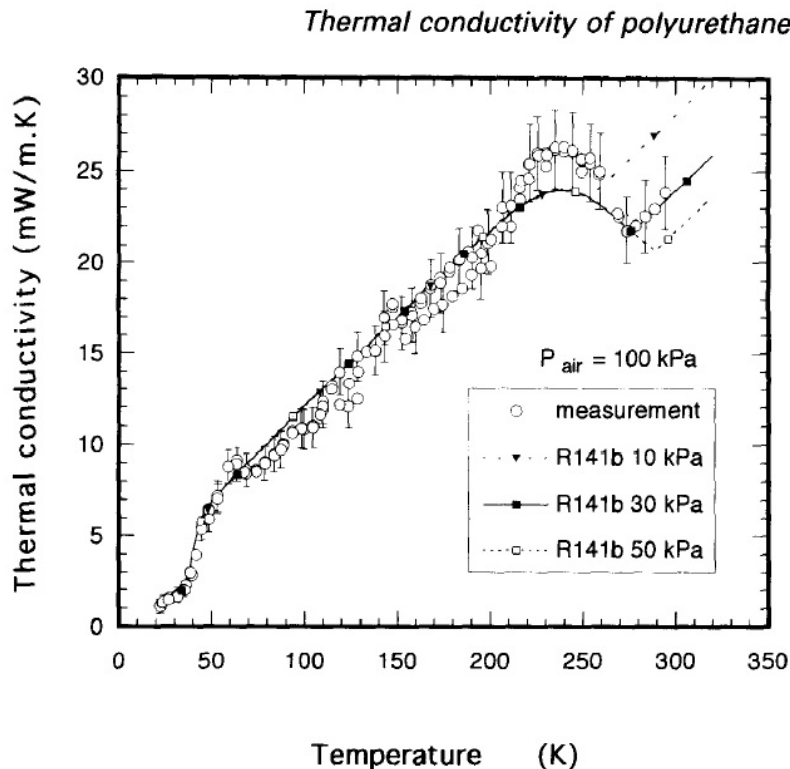
Lee & Ramesh (2004) menar att det är viktigt att hitta en balans mellan densitet, hållfasthet och värmeledningsförmågan. Enligt DUNA-Corradinis datablad för Corafoam® har materialet en densitet på 50 kg/m^3 . För att styrka detta menar Zhang, X B. (2012) i sin studie att fast polyuretanskum för kryogeniska applikationer ligger mellan 35- och 80 kg/m^3 dvs. densiteten för Corafoam® ligger inom ramarna.

Stirna, U. (2011) säger att det finns ett viktigt samband mellan tryckhållfastheten och dimensionsstabiliteten hos polyuretanskummets slutna celler. Eftersom temperaturen förändras så ändras det inre trycket genom expansion och kontraktion av cellgasen som därmed leder till en tryckskillnad i förhållande till atmosfärstrycket. Exempelvis, när skummet kyla kan en maximal tryckskillnad på 1 bar inträffa när gaserna fullständigt kondenseras. Därför rekommenderas en tryckhållfasthet på minst 0.1 MPa för polyuretanskum med slutna celler.

Corafoam® har en tryckhållfasthet enligt DUNA-Corradini på 420 kPa vilket motsvarar 0,42 MPa. Yoshimura och Kunihiro (2008) säger i sin studie att polyuretanskum med en densitet av 30- till 40 kg/m^3 har en tryckhållfasthet på 0,15 till 0,2 MPa. Sparks, (1982) har i sin studie kommit fram till att polyuretanskummet i deras forskning har en tryckhållfasthet på 380 kPa vilket motsvarar 0,38 MPa. Studierna visar olika värden på tryckhållfastheten och för att vara kritisk till DUNA-Corradinis datablad så är deras värde högre än det som har bevisats i studierna av Kunihiro (2008) och Sparks (1982).

Yang et. al. (2007) beskriver hur den termiska konduktiviteten för ett isolerande polyuretanskum är beroende av ledningsförmåga hos gasblandningen, konduktiviteten hos den fasta polymeren samt strålningen mellan celler. Vidare hävdar Yang et. al. (2007) att värmestrålningen kan minskas genom att göra cellerna mindre och att värmeöverföringen i den fasta polymeren kan minskas genom en reduktion av skumdensiteten. Konduktiviteten hos cellens gasblandning står för den största delen av materialets värmeledningsförmåga, eftersom 60 till 80 % av isoleringskapaciteten i ett skum beror på cellens gasblandning medan cellstorlekar och densiteter står för resten. Yang et. al. (2007) betonar även att värmeledningsförmågan kan vara den avgörande faktorn vid val av isoleringsmaterial på grund av miljömässiga och ekonomiska skäl.

DUNA-Corradini skriver i sitt datablad att Corafoam® med en densitet av 50 kg/m^3 har en värmeledningsförmåga på $19 \text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$ vid 10°C och atmosfärstryck. Vid 50 grader Celsius skall Corafoam® ha en värmeledningsförmåga mellan 27 och $30 \text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$. Yang et. al. (2007) hävdar i sin studie att värmeledningsförmågan i ett material minskar i samband med en minskande temperatur. I DUNA-Corradinis datablad om Corafoam® framgår inte värmeledningsförmågan vid -163°C . Av dessa skäl har figur 6 valts ut från en studie av Chung-Jen Tsen* et. al. (1997) där han visar den termiska konduktiviteten för polyuretanskum med en densitet på 50 kg/m^3 i förhållande till ett stort intervall av temperaturer.



Figur 6. Figuren visar den termiska konduktiviteten i förhållande till temperaturen för polyuretanskum (Chung-Jen Tsen* et. al. 1997).

I den här studien undersöks värmeledningsförmågan för polyuretanskum av Chung-Jen Tsen* et. al. (1997) vid 10°C (283 K), 50°C (323 K) och -163°C (110 K). Värmeledningsförmågan enligt figur 6 är följande; $10^\circ\text{C} \rightarrow 23 \text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$, $50^\circ\text{C} \rightarrow 26 \text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$ och $-163^\circ\text{C} \rightarrow 13 \text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$.

Yang et. al (2007) hävdar att ett annat skäl till varför man utnyttjar isoleringar i kalla rör är för att motverka den utomstående luftens fukttinnehåll från att kondensera på de kalla ledningarna, vilket i detta sammanhang kan det leda till isbildningar. Av den orsaken är det viktigt att isoleringen är så pass tjock att temperaturen på rörisoleringens yta är högre än den omgivande luftens daggpunkt. Stirna (2011) belyser i sin studie att det är de goda isolerings egenskaperna hos polyuretanskum som gör att den erforderliga tjockleken är mindre än för andra material.

Nominal Pipe Size (inch)	Pipe Service Temperature (°C)							
	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160	-180
1/2	35	40	50	55	60	65	70	75
1	35	45	55	60	65	75	80	85
1 1/2	40	50	60	65	70	80	85	90
2	40	50	60	70	75	85	90	95
2 1/2	45	55	65	70	80	85	95	100
3	45	55	65	75	80	90	95	105
4	45	60	70	80	85	95	100	110
6	50	60	75	85	95	100	110	120
8	50	65	75	85	95	105	115	125
10	50	65	80	90	100	110	120	130
12	55	70	80	90	105	115	125	135
14	55	70	80	95	105	115	125	135
16	55	70	85	95	105	120	130	140
18	55	70	85	95	110	120	130	140
20	55	70	85	100	110	120	130	145
22	55	70	85	100	110	125	135	145
24	55	70	85	100	110	125	135	145
26	55	75	85	100	115	125	135	150
28	55	75	90	100	115	125	140	150
30	55	75	90	100	115	125	140	150
32	55	75	90	100	115	130	140	150
34	55	75	90	105	115	130	140	155
36	55	75	90	105	115	130	140	155
38	55	75	90	105	115	130	145	155
40	60	75	90	105	115	130	145	155

* thicknesses calculated on the basis of the characteristics of our material CORAFOAM® PB 50 M1 HC.

Figur 7. Figuren visar isolationstjockleken i millimeter som krävs vid de olika temperaturerna för polyuretanskummet Corafoam® (DUNA-Corradini. 2011).

Figur 7 visar vilken tjocklek som behövs för Corafoam® i förhållande till olika temperaturer (°C) för varierande innerdiametrar i rör (NPS). Nominal pipe size (NPS) står för innerdiametern i rör och i figuren ovan anges den i den Amerikanska enheten Inch (in). En millimeter (mm) motsvarar ca 0.04 inch.

4.2 Aerogel (Cryogel® Z)

Enligt Aspen aerogel inc. (2012) är Cryogel® Z en flexibel matris täckt av kiselaerogel-partiklar med en ångbarriär. Arbetstemperaturen för Cryogel® Z ligger mellan -270 °C och 650 °C. Densiteten för Cryogel® Z är 130 kg/m³ (Aspen aerogel inc, 2012).

Hümmer et. al.(1993) har undersökt granulerade kiselaerogeler och har funnit att densiteten varierar mellan 80-150 kg/m³. Eftersom andelen kiselaerogelpartiklar inte anges för Cryogel® Z så antas ett densitetsintervall för dessa partiklar för att kunna jämföra med tillverkarens värde på värmeledningsförmåga för Cryogel® Z. Med hänsyn till ovannämnda granulerade aerogelers densiteter sätts intervallet till 80-100 kg/m³.

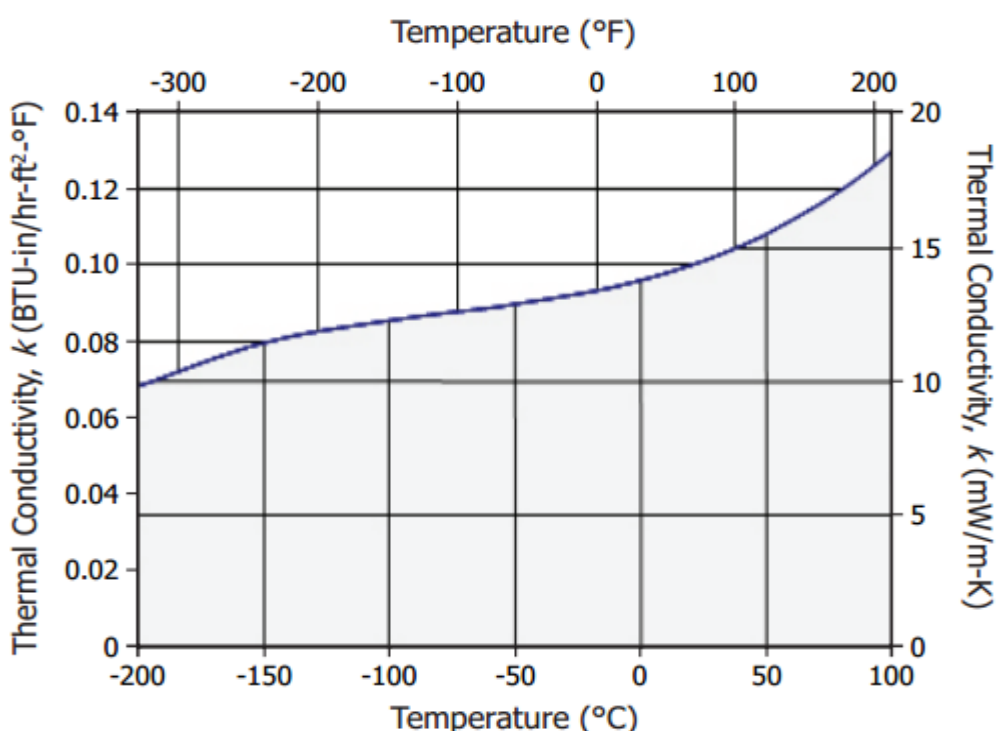
Aspen aerogel inc. (2012) hävdar att Cryogel® Z behåller sin hållfasthet och termiska prestanda vid en komprimering på 850 psi (ca 5,86 MPa). Bardy et. al. (2007) har i sin studie

undersökt hur filtmaterial med aerogelpartiklar presterar under tryck. Detta är intressant för att kunna se om Aspen aerogels siffror rörande Cryogel® Z tryckhållfasthet är trovärdiga. Vidare fann Bardy et. al. (2007) att filtmaterialen utan problem klarade belastningar på upp till 1,2 MPa.

Dess flexibilitet gör att filten tål mekaniska påfrestningar och deformationer i en hög utsträckning eftersom elasticitetsmodulen för ett filtmaterial är relativt hög jämfört med andra fasta ämnen. Det tål med andra ord stora kompressioner utan att få plastiska deformationer (Aspen aerogel inc, 2012).

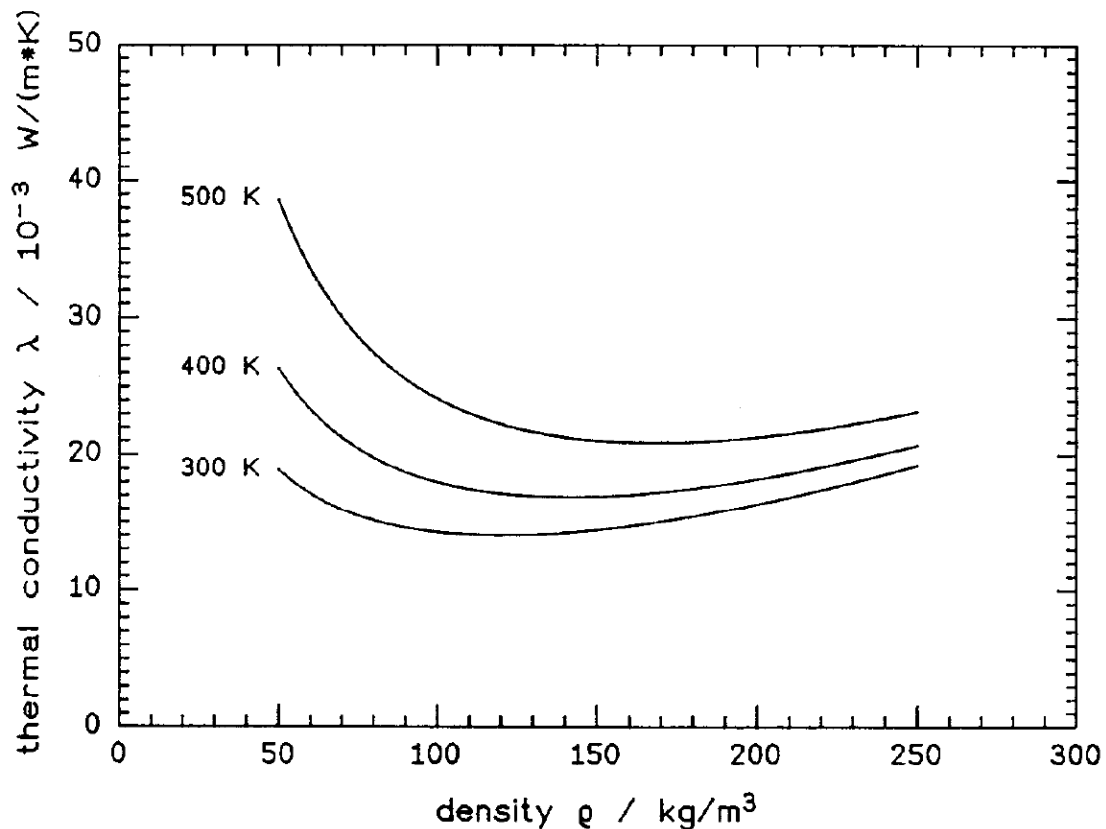
Thermal Conductivity⁺

ASTM C 177 Results



Figur 8. Figuren visar den termiska konduktiviteten i förhållande till temperaturen för Cryogel® Z (Aspen aerogel inc. 2012).

Figur 8 som är hämtad från Aspen aerogel inc. (2012) illustrerar den termiska konduktiviteten, det vill säga värmeledningsförmågan i förhållande till materialets arbetstemperatur. I tabellen i figur 8 kan man läsa av värmeledningsförmågan vid de utvalda temperaturerna. För att bevara LNG i vätskefas krävs det att gasen hålls nedkyld till -162 °C. I figur 8 har Cryogel® Z vid en temperatur på -150 °C ett *k*-värde på 11.4 mW/(m·K). En linjär interpolation mellan -150 °C och -200 °C ger ett *k* värde vid -162° C på 11.0 mW/(m·K). Mätningen genomfördes vid atmosfärstryck.



Figur 9. Värmeledningsförmågan för kisel-aerogeler vid varierad densitet (Hümmer et. al. 1993).

För att kunna verifiera Aspen aerogels påståenden om Cryogel® Z:s värmeledningsförmåga så visas i figur 9 värmeledningsförmågan för granulerade kisel-aerogeler (Hümmer et. al. 1993). Eftersom ingen specifik densitet är angiven för kisel-partiklarna i Cryogel® Z så antogs, som tidigare nämnts, ett densitetsintervall på 80-100 kg/m³. Dett ger, enligt figur 9, en värmeledningsförmåga vid 300 K på mellan 14-15 mW/(m·K).

Enligt figur 8 har Cryogel® Z en värmeledningsförmåga vid 300 K på 14,7 mW/(m·K). Dessa data pekar på att värmeledningsförmågan angiven av Aspen aerogel för Cryogel® Z är relevant och trovärdig.

Cryogel® Z Thickness (mm) vs. Temperature (°C)																			
NPS (mm)	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100	-110	-120	-130	-140	-150	-160	
15	10	10	15	15	20	20	25	25	30	30	35	35	35	40	40	40	45	45	5 mm product
20	10	10	15	20	20	25	25	30	30	30	35	35	40	40	40	45	45	45	
25	10	10	15	20	20	25	25	30	30	35	35	40	40	40	45	45	50	50	
40	10	15	15	20	25	25	30	30	35	35	40	40	45	45	50	50	50	55	
50	10	15	15	20	25	25	30	35	35	40	40	45	45	50	50	50	55	55	
80	10	15	20	20	25	30	30	35	40	40	45	45	50	50	55	55	60	60	
100	10	20	20	20	30	30	40	40	40	50	50	50	50	60	60	60	60	70	5 mm and/or 10 mm product
150	10	20	20	30	30	30	40	40	50	50	50	60	60	60	60	70	70	70	
200	10	20	20	30	30	40	40	40	50	50	50	60	60	60	70	70	70	80	
250	10	20	20	30	30	40	40	40	50	50	60	60	60	70	70	70	80	80	
300	10	20	20	30	30	40	40	50	50	50	60	60	60	70	70	70	80	80	
350	10	20	20	30	30	40	40	50	50	50	60	60	70	70	70	80	80	80	
400	10	20	20	30	30	40	40	50	50	50	60	60	70	70	70	80	80	80	
450	10	20	20	30	30	40	40	50	50	60	60	60	70	70	70	80	80	80	
500	10	20	20	30	30	40	40	50	50	60	60	60	70	70	80	80	80	90	
600	10	20	20	30	30	40	40	50	50	60	60	70	70	70	80	80	80	90	
700	10	20	20	30	30	40	40	50	50	60	60	70	70	70	80	80	80	90	
750	10	20	20	30	30	40	40	50	50	60	60	70	70	70	80	80	90	90	
900	10	20	20	30	30	40	40	50	50	60	60	70	70	70	80	80	90	90	
1200	10	20	20	30	30	40	40	50	50	60	60	70	70	80	80	80	90	90	
Flat	10	20	20	30	40	40	50	50	60	60	70	70	70	80	80	90	90	100	

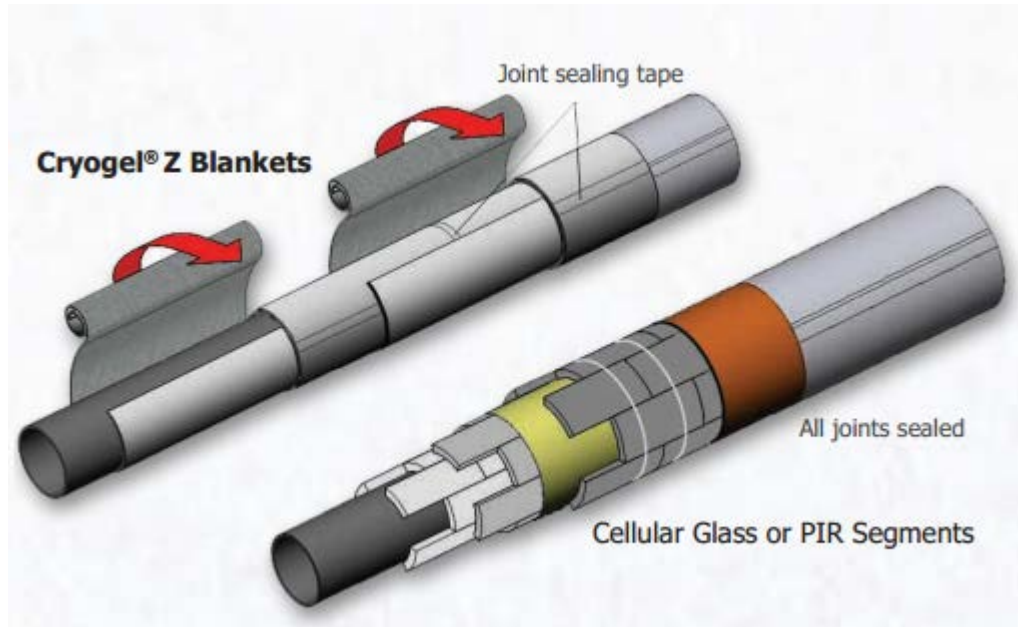
Figur 10. Figuren visar Tjockleken i millimeter som krävs vid olika temperaturer för Cryogel® Z (Aspen aerogel inc. 2012).

Aspen aerogel inc. (2012) hävdar att figur 10 talar om hur tjock isoleringsmaterialet bör vara vid olika NPS, beroende av temperaturen för att förhindra kondensering på rörisoleringens yta och för maximal isoleringsprestanda.

På grund av att aerogelfiltar tillverkas av amorf kisel med 97 % av partiklarna större än 45 µm lider isolerings filtarna av damm produktion. Några hälsoinstitut såsom; *the International Agency for research on cancer (IARC)*, *The organization for economic Co-operation and development (OECD)* och *occupational safety and health administration (OSHA)*, hävdar, efter att ha studerat de amorfa kiselpartiklarna, att dessa partiklar inte är skadliga för människohälsan. Den typiska andningsbara dammhalten för kommersiella aerogel-isoleringsprodukter är 5 mg/m³ medan gränsen ligger på 80 mg/m³. Den personliga skyddsutrustningen som rekommenderas när man hanterar isoleringsmaterialet består av en P100 respirator, arbetshandskar och skyddsglasögon. Det konstateras dock att kontakten med dessa partiklar kan ge en känsla av torrhet mot huden och irritation på hud, ögon och andningsvägar (Aspen aerogel, 2012).

4.3 Jämförelse av Corafoam® och Cryogel® Z

Polyuretanskummet (Corafoam®) och aerogelen Cryogel® Z är två isoleringsmaterial med liknande egenskaper dock med vissa särdrag. Corafoam® levereras i segment medan Cryogel® Z levereras i flexibla filter som lindas runt röret (se figur 11).

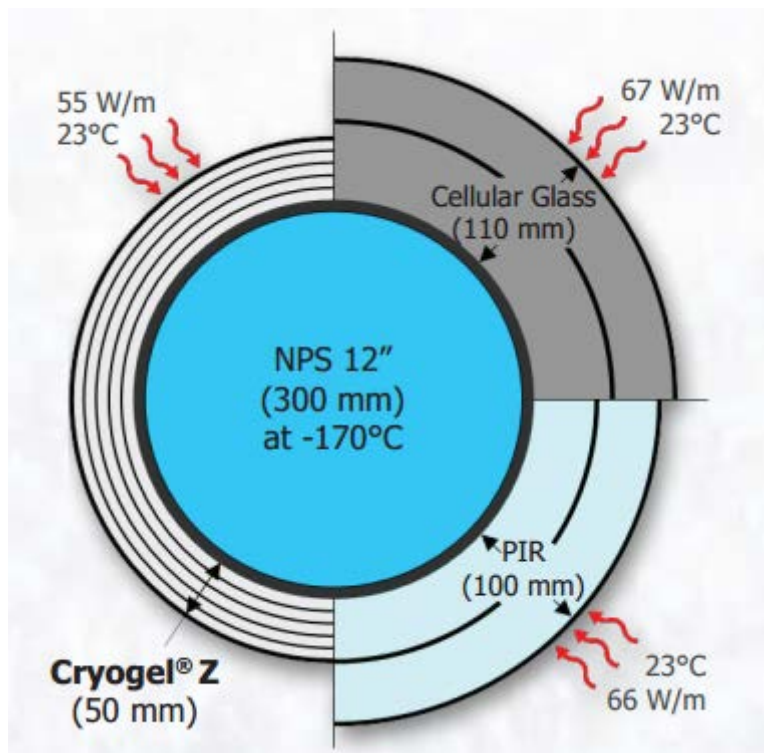


Figur 11. Figuren visar Cryogel® Z filter och PIR segment (Aspen aerogel inc. 2012).

Vid isolering med PIR/PUR-segment är det viktigt att få det lufttätt mellan blocken för att förhindra kondensering vid kryotekniska förhållanden. Nackdelen med detta hårda material är att det finns risk för sprickbildning och att det kan förlora sin elasticitet vid låga temperaturer. Vidare har Corafoam® enligt DUNA-Corradini. (2011) en vatten absorption på ca 0,4 % medan för Cryogel® Z är den mindre än 1,1 % av massan (Aspen aerogel inc. 2012). Även om Corafoam® har en betydligt lägre vattenabsorption så klarar Cryogel® Z mekaniska påfrestningar vid frostsprängning betydligt bättre eftersom det är ett flexibelt material.

Som en jämförelse av godstjocklek mellan Corafoam® och Cryogel® Z antas att ett rör med måttet 100 mm skall isoleras. I röret transporteras det LNG som skall hållas nedkyllt i -162 °C. Enligt figur 10 innebär det för Cryogel® Z att vid -163° C och en innerdiameter på 100 mm att det krävs en isolerings tjocklek på 70 mm. Figur 7 visar att vid -163° C och en innerdiameter på 4 inch (ca 102 mm) så behöves för Corafoam® en tjocklek på 100 mm. Vid dessa omständigheter sparas alltså 30 mm i isolationstjocklek (30 %).

Värmeledningsförmågan kan i de flesta fallen vara den avgörande faktorn vid materialval av miljömässiga och ekonomiska skäl. Enligt figur 8 konstaterades att Cryogel® Z hade en värmeledningsförmåga på 11 mW/(m·K) vid -162 °C. På motsvarande vis för Corafoam® kan det enligt figur 6 antas att vid en temperatur på -163° C erhåller materialet en värmeledningsförmåga på 13 mW/(m·K). En differens på 2 mW/(m·K) är inte omfattande men är dock en tydlig skillnad.



Figur 12. Figuren visar Värmeflödet genom Cryogel® Z, PIR och Cellulär glas (Aspen aerogel inc. 2012).

För att förtydliga värmelägningsförmågan kontra tjockleken hos Cryogel Z och polyuretanskum visar figur 12 skillnaden mellan de två materialen. Dock visar inte figuren de siffror som studien behandlat men ger ändå en ungefärlig illustration av skillnaden.

Figur 12 visar ett värmeflöde på 55 W/m genom Cryogel® Z vid 23 °C. Värmeflödet för polyuretanskummet ligger på 66 W/m vid 23°C. Denna skillnad är på grund av att Cryogel® Z har en lägre värmeledningsförmåga än polyuretanskummet.

Röret som isoleras i figur 12 har en NPS på 300 mm och en temperatur på -170 °C. Tjockleken för Cryogel® Z landar på 50 mm och 100 mm för polyuretanen. Skillnaden i tjocklek är 50 %.

4.4 Förmågan att tätta vid kryogeniska förhållanden

Rae & Dattlebaum (2004) har i sin studie visat på kompressionsegenskaperna för PTFE vid låga temperaturer. PTFE kan tåla kompressioner upp till ca 35 % vid -198 °C, spänningen uppgår då till ca 500 MPa. Vid 30 % kompression så uppgår spänningen till ca 420 MPa. Leventis et. al. (2008) har i sina tester visat att en korslänkad vanadinaerogel vid -196 °C är kapabel att motstå upp till 81 % kompression. Vid detta belastningsfall uppgår spänningen till ca 500 MPa, medan vid 30 % så uppgår spänningen till 50 MPa. Båda ämnena har ett elastiskt spektrum upp till 4 % kompression vid -196 respektive -198 °C, därefter börjar plastiska deformationer förekomma.

Desai et al (1984) har bestämt vanadiums elektriska resistivitet vid -162 °C till $5 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$, vilket ger den en resistivitet i klass med metaller överlag.

Zirkonium-/volframoxiden har en unik egenskap som kan vara användbar i kryogeniska tätningar eftersom dess värmeutvidgningskoefficient är negativ. De Buysser et. al. (2007) har bestämt utvidgningskoefficienten till $-10,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

5. Diskussion

5.1 Metoddiskussion

Enligt Höst m.fl. (2006) är reliabilitet det mått som mäter hur hög tillförlitlighet det finns i materialet som samlats in. Vidare menar han att validitet redogör för hur det materialet som använts stämmer i samband med det studien haft i åtanke att undersöka (2006).

Litteraturstudien grundas på information hämtat ur databaser som innehåller vetenskapliga artiklar, vilket leder till en god reliabilitet. Den insamlade informationen har även hämtats på ett liknande sätt för att på så vis uppnå en god reliabilitet. Dock kan den även ifrågasättas då viss information är hämtad ur datablad, där tillverkare har publicerat informationen, vilket resulterar i att informationen kan anses som subjektiv. Av den anledningen har databladerna kritiskt granskats innan de använts i studien.

Höst m.fl. (2010) belyser vikten av att studiens datainsamling bör redovisas och analyseras på ett sätt som belyser studiens problemställning, för att på så sätt nå trovärdighet. Informationen som använts i denna studie bedöms i sin helhet adekvat och relevant för litteraturstudiens syfte och har bearbetats på ett riktigt sätt, där informationen söktes ur databaser och noga valts ut. Vidare har litteraturstudien haft som krav att genomsyra studiens ändamål och mynna ut i ett relevant resultat. Vi anser därför att datainsamlingen redovisats och analyserats enligt hur Höst m.fl. (2010) beskriver, vilket medför att studien har god validitet.

Eftersom litteraturstudien utgår från kvantitativa rapporter och dokument så hade resultatet, oavsett vald metodik troligen förblivit detsamma, eftersom fysikaliska egenskaper inte ändras beroende på vilket metodik studierna genomförs med. Intervjuer hade kunnat producera ett annat resultat, men enbart beroende på att det då inte längre hade varit objektivt utan baserat sig på subjektiva åsikter.

5.2 Resultatdiskussion

Under de senaste femton åren har många applikationer identifierats för aerogelmaterial men kommersialiseringen har varit långsam. Dock har antalet företag som producerar aerogelmaterial ökat på marknader såsom isolering och elektronik. En viktig aspekt av detta är den synergi som uppstår då tillverkare samverkar om utveckling av nya material och användningsområden. Ett annat tecken på framsteg inom fältet är den ökande mängden patent som involverar aerogelmaterial (Hrubesh, 1998).

5.2.1 Isolering

Resultaten som tagits fram för isoleringsmaterialen Corafoam® och Cryogel® Z pekar på tydliga skillnader, vilka diskuteras nedan.

Tryckhållfastheten för dessa material skiljer sig rejält. Corafoam skall enligt DUNA-Corradini (2011) tåla ett tryck på 0,42 MPa och enligt Sparks, L L. (1982) studie 0,38 MPa. Ingen av dessa tryck kan mäta sig med Cryogel® Z:s 5,86 MPa. Bardy et. al. (2007) har i sin studie funnit att aerogelfiltmaterial behåller sin hållfasthet och värmeledningsförmåga vid ett tryck upp till 1,2 MPa. Detta visar på att flexibla isolationsmaterial är mycket mera tåliga för mekaniska påfrestningar än fasta isolationsmaterial. Om materialet klarar av 5,86 MPa som Aspen aerogel hävdar har inte kunnat styrkas, för det krävs testmetoder som ligger utanför den här studiens valda metod.

Gällande den termiska konduktiviteten för dessa material så är den betydligt mer likvärdig. DUNA-Corradini (2011) avslöjade inte värmeledningsförmågan för Corafoam® vid -163 grader utan k -värdet baseras på Chung-Jen Tsen et. al. (1997) studie, vilket å andra sidan är en mer pålitlig källa än DUNA-Corradinis datablad för Corafoam. K -värdet för polyuretanskummet i figur 6 bestämdes till $13 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ jämfört med Cryogels Z:s $11 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Cryogel® Z är alltså något bättre, även i detta avseende. Hümmer et. al. (1993) har visat att värmeledningsförmågan för granulerade kiselaerogeler ligger i samma spektrum som för Cryogel® Z vid högre temperaturer, vilket gör att trovärdigheten på dessa uppgifter kan anses hög. Detta tyder, som tidigare nämnts, på att båda materialen är dåliga värmeledare, vilket är det som eftersöks vid kryotekniska isoleringar.

Enligt figur 12 hävdar Aspen aerogel att Cryogel® Z reducerar isolerings tjockleken med 50 % jämfört med polyuretanskum. Resultatet som har tagits fram i litteraturstudien ger en tjockleksreducering på 30 % om Cryogel® Z väljs framför polyuretanskummet. Det är en skillnad på 20 % mellan det som Aspen aerogel utlovar i förhållande till det litteraturstudien pekar på. Siffrorna stämmer inte riktigt överens dock visar båda fallen på en tydlig skillnad i isolationstjocklek. Med tanke på att litteraturstudien baseras på vetenskaplig forskning betraktas deras resultat som pålitligare data.

Cryogel® Z:s minimala tjocklek resulterar i en mindre yta och minskad värmevinst jämfört med PUR. Denna aspekt maximerar systemets prestanda genom att förbättra processtyrningen, minska förångningen och spara energi. Mindre tjocklek resulterar också i volym- och fraktbesparingar, minimal platslagring och en förenklad logistik.

Det konventionella materialet kräver många segment som ska vara effektivt tätade för maximal isoleringsförmåga. Tjockleken på aerogelfiltarna är tillräcklig för att uppfylla uppställda värmebegränsningar. Till skillnad från PUR saknar Cryogel® Z jäs medel som kan diffundera ut med tiden och försämra isoleringsförmågan. Detta gör att Cryogel® Z:s termiska prestanda förblir konstant över tiden.

Aspen aerogel (2006) hävdar att Cryogel® Z är lätt att installera men samma påstående har inte bekräftats i litteraturstudien för polyuretanskum. Logiskt sett håller man med om att installationen av ett flexibelt material skulle kräva mindre resurser än med ett förformat material, samt att tätningen mellan rör och material blir bättre med ett flexibelt material eftersom rör kan vara lite ovala i vissa delar.

Under kryogeniska förhållanden påverkas inte Cryogel® Z av en termisk chock utan förblir helt flexibel. Detta till skillnad från det styva konventionella materialet som kan uppleva sammandragningar och en termisk chock vid extrema påfrestningar vilket leder till plastiska deformationer och sprickbildningar.

5.2.2 Tätningar

Resultaten visar att Vanadinaerogelen kan motstå i princip samma spänningar som PTFE. Vanadinaerogelen är dock mera benägen att komprimeras vid en aningen lägre spänning, teoretiskt kan detta motverkas genom att tätningen förpressas innan den monteras.

En annan intressant egenskap hos vanadin är att det är en relativt god elektrisk ledare. Detta kan göra att uppbyggnaden av potentialskillnader kan reduceras och förebygga galvanisk korrosion. Däremot hindras antagligen den elektriska konduktiviteten av polymererna i materialet. Det behövs ytterligare data för att utvärdera den hypotesen.

För zirkonium/volfram-oxiden har inga materialdata kunnat frambringas förutom för dess värmeutvidgningskoefficient. Dock så kan det vara fördelaktigt som ett tillsatsmaterial för att minska påverkan av dimensionsförändringar på grund av temperaturdifferentialer. Genom att minska de termiska spänningarna som uppstår när material kontraherar eller expanderar kan större säkerhetsmarginaler och bättre funktion åstadkommas.

6. Slutsatser

Från denna studie kan slutsatsen dras att aerogelmaterialet Cryogel® Z har många fördelar som isoleringsmaterial jämfört med polyuretanskum. Utifrån resultaten och diskussionen har Cryogel® Z en mindre värmeledningsförmåga än polyuretanskummet. Cryogel® Z tål mekaniska påfrestningar bättre än vad polyuretanskummet gör. Vidare sparas mer utrymme vid val av Cryogel® Z eftersom studien visat att godstjockleken reduceras med 30 %.

Det finns aerogelmaterial som är lämpliga för att användas som tätningar i rörsystem vid kryogeniska förhållanden. Det kan i det undersökta fallet tyda på att det är likvärdigt med det normalt använda materialet. De lämpligaste materialegenskaperna är förmågan att bibehålla sin elasticitet vid låga temperaturer.

Författarna anser att aerogel är ett lovande material för framtiden och det kommer att bli intressant att se dess utveckling på marknaden. Experimentella studier av vanadiumaerogel som tätningsmedel är något som borde undersökas vidare. Vidare borde ekonomiska förutsättningarna för investeringar i samt installation av aerogelmaterial undersökas.

Referenser

Litteratur

- Alvarez, H. (2006). *Energiteknik*. Studentlitteratur.
- Höst, M., Regnell, B. och Runeson, P. (2006) *Att genomföra examensarbete*. Lund: Studentlitteratur AB.
- McGuire & White. (2000). *Liquefied gas handling principles on ships and in terminals*. London: Witherby.

Vetenskapliga artiklar

- Baetens, R., Jelle, P. B. & Gustavsen, A. (2011) *Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review*. *Energy and buildings*, Volume 43, Issue 4, pp. 761–769.
- Bardy E.R., Mollendorf J.C., Pendergast D.R. (2007). *Thermal conductivity and compressive strain of aerogel insulation blankets under applied hydrostatic pressure*. *Journal of heat transfer*, vol 129, issue 2, page 232-235.
- Christiansson, A (2012). *Kemikalier i plaster*. Miljöstyvningsrådet, Rapport 2012:3.
- De Buysser K., Smet P. F., Schoofs B., Bruneel E., Poelman D., Hoste S., Van Driessche I., (2007), *Aqueous sol–gel processing of precursor oxides for ZrW_2O_8 synthesis*, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, Volume 43, Issue 3, pp. 347-3.
- Demharter, A. (1998) *Polyurethane rigid foam, a proven thermal insulating material for applications between +130 C and -196 C*. *Cryogenics* 38, 113-117.
- Desai P. D., James H. M. & Ho C. Y (1984), *Electrical Resistivity of Vanadium and Zirconium*, *J. Phys. Chem. Ref. Data* 13, 1097.
- Flitney, R.K. & Brown, M.W. (2007). *Seals and sealing handbook [Elektronisk resurs]*. (5. ed.) Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann.
- Hümmer E., Th. Rettelbach, X. Lu, J. Fricke (1993). *Opacified silica aerogel powder insulation*. *Thermochimica Acta*, 218, 269-276.
- International Energy Agency (2011). *Key world energy statistics 2011*. Paris: International Energy Agency.
- International Energy Agency (2011). *World energy outlook. 2011*. Paris: International Energy Agency.

- International Energy Agency (2012). *World energy outlook. 2012*. Paris: International Energy Agency.
- Jones S. M. (2006). *Aerogel: Space exploration application*. J Sol-Gel Sci Techn, 40:351-357.
- Jyoti L. Gurav, In-Keun Jung, Hyung-Ho Park, Eul Son Kang, and Digambar Y. Nagargi. (2010). *Silica Aerogel: synthesis and applications*. Journal of nanomaterials, volume 2010, 11 pages.
- Kaneyoshi, A. (2006). Chapter, 4. *Polyurethane Foams. Polyurethane and Related Foams*. Chemistry and Technology, Pages: 65-99.
- Kuniyoshi Y. (2008). *Cryogenic insulating material*. Government & Official Publications.
- Lawrence W. H. *Aerogel applications*. Journal of non-crystalline solids, (1998), Volume 225, pp. 335-342.
- Lee, S. T & Ramesh, N.S. (2004). Chapter 7. *Rigid Polyurethane Foams. Polymeric Foams*. Mechanisms and Materials.
- Leventis N., Sotiriou-Leventis C., Mulik S., Dass A., Schnobrich J., Hobbs A., Fabrizio E. F., Luo H., Churu G., Zhangd & Lu H., (2008), *Polymer nanoencapsulated mesoporous vanadia with unusual ductility at cryogenic temperatures*, Journal of Material Chemistry, edition 18, pp. 2475-2482.
- Olson, E. (2004). *Redovisning av artikelsökning i databaser*. Medicinska fakulteten: Lunds universitet.
- Pierre A. C. (2011). *History of Aerogels*, In B, Aegerter M. A., Leventis N. & Koebel M. M. (Eds), *Aerogel Handbook* (pp. 3-18). Springer New York.
- Rae P. J., Dattelbaum D.M. (2004), *The properties of poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) in compression*, Polymers, Volume 45, Issue 22, pp. 7615–7625.
- R.K. Treager (1967). *physical properties of rigid polyurethane foams*. Journal of cellular plastics, 3:405.
- Soleimani D., Abbasi M.H. (2008) *Silica aerogel; synthesis, properties and characterization*. Journal of materials processing technology, 199, s. 10-26.
- Sparks, L L. (1982). *Thermal and Mechanical Properties of Polyurethane Foams at Cryogenic Temperatures*. Annual Report, January-December 1981. Pages: 58.

- Steven M. Jones. (2006). *Aerogel: Space exploration application*. J Sol-Gel Sci Techn, 40:351-357.
- Stirna, U. (2011). *Mechanical properties of rigid polyurethane foams at room and cryogenic temperatures*. Volume 47. Pages: 337-355. Journal of Cellular Plastics.
- Tsen C.-J., Yamaguchi M. and Ohmorit T. (1997) *Thermal conductivity of polyurethane foams from room temperature to 20 K*. Cryogenics 37. 305-312.
- U. Stirna, I. Beverte, V. Yakushin and U. Cabulis (2011). *Mechanical properties of rigid polyurethane foams at room and cryogenic temperatures*. Journal of cellular plastics 47:337.
- V.A. Yakushin, U.K. Stirna och N. P. Zhmud (1999). *Effect of the chemical structure of the polymer matrix on the properties of foam polyurethanes at low temperatures*. Mechanics of composite materials, Vol. 35, No. 4.
- Yang C.G., Xu L., Chen N. (2007). Thermal expansion of polyurethane foam at low temperature. Energy conversion and management 48, 481-485.
- Zhang, X B. (2012). *Experimental study on cryogenic moisture uptake in polyurethane foam insulation material*. Volume 52. Pages: 810-815.

Internetkällor

- Aspen Aerogels (2012)
< <http://www.aerogel.com/#6>>. [Acc 2014-05-03].
- Aspen aerogel inc. (2012). *Cryogel Z. Aspen aerogel data sheet*.
<http://www.aerogel.com/products/pdf/Cryogel_Z_DS.pdf>. [Acc 2014-05-01].
- Aspen aerogel inc. (2012). *Cryogel® Z: Proven in cryogenic service, project profiles*.
< http://www.aerogel.com/Aspen_Aerogels_Cryogel_Z_Projects.pdf> [Acc 2014-05-01].
- DUNA-Corradini. (2011). *Polyurethane/Polyisocyanurate for cryogenic insulation*. Innovation providers. <<http://www.dunagroup.com/dati/pdf/depliant-criogenico.pdf>> [Acc 2014-05-01].
- Sol-Gel technology scheme (2013).
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:SolGel_Technology_Scheme.png?uselang=sv>[Acc 2014-05-03].
- Omslagsbild på aerogelmaterial 1
< <http://buyaerogel.com/wp-content/uploads/2013/12/silica-aerogel-black-900x900.jpg>> [Acc 2014-06-04].

- Omslagsbild på aerogelmaterial 2
< <http://www.aerogem.com/photos/aerogel-32b.jpg> > [Acc 2014-06-04].