

LIVSLÄNGD FÖR HYBRIDISOLERADE FJÄRRVÄRMERÖR

RAPPORT 2019:593



 FUTUREHEAT



Livslängd för hybridisolerade fjärrvärmerör

**BIJAN ADL ZARRABI
ALIREZA MARZBANRAD**

ISBN 978-91-7673-593-0 | © Energiforsk juni 2019

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Fjärrvärme är en beprövad teknik men det finns fortfarande utrymme för förbättring och effektivisering. Effektivisering av fjärrvärmenätet via förbättring av rörets isolering har olika fördelar, dels genom att ge en direkt reduktion av systemets totala värmeförluster men även genom möjligheten att minska rördiametern utan att öka förlusterna. Det finns frågeställningar som måste utredas för att kunna implementera högpresterande fjärrvärmerör i stor skala, exempelvis livslängden för de hybridisolerade fjärrvärmerören och den ekonomisk återbetalningstiden. Här utgör projektet, *Livslängd hos hybridisolerade fjärrvärmerör*, ett viktigt bidrag.

Projektet har letts och genomförts av Bijan Adl Zarrabi tillsammans med kollegan Alireza Marzbanrad på Chalmers Tekniska Högskola.

En fokusgrupp som bestått av Magnus Ohlsson (ordförande) Öresundskraft; Ted Edén, Norrenergi; Henrik Landersjö, E.ON Lokala Energilösningar AB; Patrik Nilsson, E.ON Lokala Energilösningar AB; Per Bonnevier, Norrenergi; Shahriar Badiei, Vattenfall AB; Björn Larsson, Mälarenergi AB; Ingemar Andersson, Mälarenergi AB; Lars-Erik Hammarström, Tekniska Verken i Linköping AB och Holger Feurstein, Kraftringen har följt och kvalitetssäkrat projektet.

Projektet ingår i programmet FutureHeat vars långsiktiga mål är att bidra till visionen om ett hållbart uppvärmningssystem med framgångsrika företag som utnyttjar nya tekniska möjligheter och där de samhällsinvesteringar som gjorts i fjärrvärme- och fjärrkyla tas till vara på bästa sätt.

Programmet leds av en styrgrupp bestående av Charlotte Tengborg (ordförande), E.ON Lokala Energilösningar AB, Lars Larsson, AB Borlänge Energi; Magnus Ohlsson, Öresundskraft AB; Fabian Levihn, Stockholm Exergi AB; Niklas Lindmark, Gävle Energi AB; Jonas Cognell; Göteborg Energi AB; Lena Olsson Ingvansson, Mölndal Energi AB; Anna Hindersson, Vattenfall Värme AB; Anders Moritz, Tekniska verken i Linköping AB; Staffan Stymne, Norrenergi; Holger Feurstein, Kraftringen; Joacim Cederwall, Jönköping Energi AB; Maria Karlsson, Skövde Värmeverk AB; Sven Åke Andersson, Södertörns Fjärrvärme AB; Henrik Näsström, Mälarenergi AB och Fredrik Martinsson (adjungerad) Energiforsk.

Suppleanter har bestått av Peter Rosenkvist, Gävle Energi; Johan Brossberg, AB Borlänge Energi; Mats Svarc, Mälarenergi AB; Johan Jansson, Södertörns Fjärrvärme AB och AnnBritt Larsson, Tekniska verken i Linköping AB.

Fredrik Martinsson, programansvarig FutureHeat



Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Hybridisolering av fjärrvärmerör med vakuumpaneler minskar värmeförlusterna i ett fjärrvärmenät. Efter mer än 8 år visar resultaten från laboratorium och fältstationer att hybridisoleringens försämring med tiden är runt 1–1,5 per år. Detta betyder att om försämring skulle vara linjärt har hybridisolerade fjärrvärmerör med vakuumpaneler en livslängd mellan 50–100 år.

I tidigare projekt visades att hybridisolering av fjärrvärmerör minskar värmeförlusterna med nästan 50 % för ett singelrör och med runt 30 % för ett dubbelrör. Prestanda för hybridisolerade fjärrvärmerör med vakuumpaneler har endast förändrats marginellt efter nära 5 år i bruk, se Fjärrsynrapport 2017:420.

Huvudfrågan för detta projekt var att följa upp mätningar från laboratorium och fältstationer för att kunna identifiera storleken på förändringar i vacuumisolerade fjärrvärmerör. Resultaten från mätningar visar att förändring (åldring) i värmekonduktivitet är runt 1–1,5 % per år.

Mätningar i laboratorium startades för nästan 7 år sedan. Förändring i värmekonduktivitet hos de hybridisolerade fjärrvärmerören beräknades att vara 1%/per år vid en framledningstemperatur av 115 °C.

Resultaten från den äldsta fältstationen, Susvindsvägen i Varberg, som initierades för mer än 7 år sedan visar att förändringen i värmekonduktivitet hos de hybridisolerade fjärrvärmerören är 1,5% per år vid en framledningstemperatur av 78–115 °C. Den högre förändringshastigheten kan bero på de temperaturväxlingarna som finns i ett fjärrvärmenät.

Summary

Hybrid insulation of district heating pipes with vacuum panels reduces heat losses in a district heating network. After more than 8 years, the results from the laboratory and field stations show that the deterioration of the hybrid insulation with time is around 1–1.5 per year. This means that by assuming that the deterioration is linear, hybrid-insulated district heating pipes with vacuum panels have a lifetime of between 50 and 100 years.

In previous projects, it was shown that hybrid insulation of district heating pipes reduces heat losses by almost 50% for a single pipe and by about 30% for a twin pipe. The performance of hybrid insulated district heating pipes with vacuum panels has only changed marginally after nearly 5 years in use, Report 2017: 420, Fjärrsyn

The main question for this project was to follow up measurements from laboratory and field stations to identify the rate of changes of thermal conductivity in vacuum-insulated district heating pipes. The results of measurements show that the change in heat conductivity is around 1–1.5% per year.

Measurements in laboratory were initiated almost 7 years ago. The change in heat conductivity of the hybrid insulated district heating pipes is calculated to be 1% at a supply temperature of 115 °C.

The results from the oldest field station, Susvindsvägen in Varberg, where measurements were initiated more than 7 years ago show, that the change in thermal conductivity of the hybrid insulated district heating pipes is 1.5% at a supply temperature of 78–115 °C. The higher rate of change, compare to measurements in laboratory, may be due to the seasonal temperature variations in a district heating network.

Innehåll

1	Introduktion	7
	Syfte	7
2	Mätdatainsamling och analys	8
2.1	Mätdataanalys – laboratoriemiljö	8
2.1.1	Vakuumisolerade panelens livslängd	9
2.1.2	Uppskattning av de hybridisolerade rörens försämring	9
2.2	MÄTDATAANALYS – fältstationer	11
2.2.1	Susvindsvägen	12
2.2.2	Hisingen	14
2.2.3	Linköping	18
2.3	Helsingborg	20
3	Slutsatser	21
	BILAGA 1.A. Station Susvindsvägen	22
	BILAGA 1.B. Station Susvindsvägen	23
	BILAGA 2. Station Hisingsbacka	24
	BILAGA 3. Station Linköping	25
	BILAGA: 4: Station Helsingborg,	26
	BILAGA: A: Hybrid Insulated Pipes at Laboratory Evaluation of lifetime	27

1 Introduktion

Cirka 10 % av värmeenergin som skickas ut i fjärrvärmenätet försvinner på grund av värmeförluster från fjärrvärmerören. Förlusten kan vara över 40 % för delar av nätet där energiuttaget är litet. Med introduktion av högpresterande isolering runt framledningsröret (hybridisolering) kan värmeförlusterna reduceras med 35-50 %.

Det här projektet bygger på de tidigare Fjärrsynprojekten Högpresterande fjärrvärmerör och Hybridisolerade fjärrvärmerör (Rapport 2012:16, Rapport 2013:23 och Rapport 2017:420) där högpresterande värmeisoleringsmaterial, vakuumisoleringspanel (VIP), har undersökts för isolering av fjärrvärmerör. Vakuumpanelerna fästs närmast medieröret och de hålls på plats med omgivande polyuretanskum. Resultaten från projekten var så lovande att provrör tillverkades för att ingå i ett antal distributionsnät. I december 2011 beslutade projektets styrgrupp att provanläggningen för fältmätningar på hybridisolerade rör skall prioriteras. Syftet med initiering av fältstationer var att komplettera tester i laboratorium gällande undersökning av livstid och prestanda för hybridisolerade fjärrvärmerören.

SYFTE

Målet med detta projekt är att fortsätta mätningarna i laboratorium och vid fältstationer för att kunna fastställa livslängden för hybridisolerade fjärrvärmerör. Resultaten från dessa mätningar skall användas för att komplettera de befintliga modellerna för bedömning av livslängden för fjärrvärmerören.

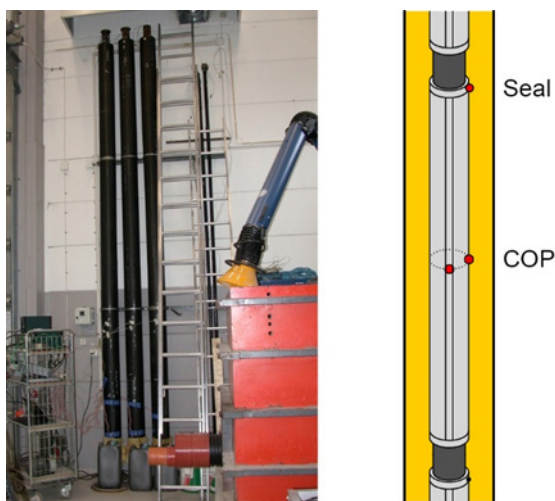
2 Mätdatainsamling och analys

Mätdata har samlats i laboratoriemiljö och från ett antal fältstationer. Fältstationerna är placerade i Varberg, Hisingsbacka (Göteborg) och Linköping. En ny fältstation har utrustats i Helsingborg under detta projekt. Mätdatainsamlingen påbörjades i slutet av 2012 (i laboratoriemiljö). Fältstationen i Varberg var den första fältstationen och den startade i början av 2012.

Generellt är det enklare att analysera insamlad mätdata från laboratoriemiljö. Därför försökte forskargruppen att identifiera analysmetoder för mätdata från laboratoriet för att kunna applicera på fältstationerna.

2.1 MÄTDATAANALYS – LABORATORIEMILJÖ

Långtidsmätningar på ett hybrid isolerat singelrör har utförts i laboratorium vilket presenterades i Rapport 2017:420 Energiforsk. Rören har haft en konstant framledningstemperatur på 115°C i över sex år. Mätuppställningen visas i Figur 1 där mätpunkterna COP (Center Of Panel) visar temperaturen på mitten av panelens baksida och 'Seal' visar temperaturen i sömmen.



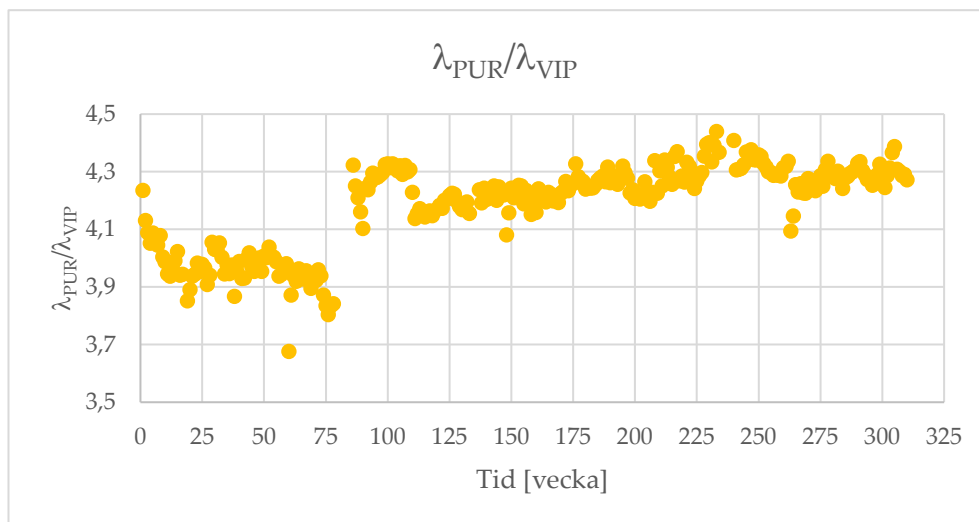
Figur 1 Mätuppställning i laboratorium och mätpunkternas placering

Analysen i tidigare projekt var baserad på att hitta kvoten mellan värmekonduktiviteten hos vacuumpanel (VIP) och polyuretan (PUR) enligt Ekvation 1.

$$\frac{\lambda_{PUR}}{\lambda_{VIP}} = \frac{\Delta T_{VIP}}{\Delta T_{PUR}} \cdot \frac{\ln(\Delta r_{PUR}/r_{0,PUR} + 1)}{\ln(\Delta r_{VIP}/r_{0,VIP} + 1)} \quad (1)$$

Slutsatsen från tidigare analyser var 'Vakuumpanelens värmekonduktivitet är mellan 3 och 4 gånger högre än värmekonduktiviteten hos polyuretanet. Små variationer och inhomogeniteter som lokalt påverkar temperaturen kommer in i Ekvation (1). Detta betyder att det är en stor osäkerhet kring det exakta relativa värdet på värmekonduktiviteterna men kontinuiteten i mätningarna visar dock att panelerna fortfarande är hela.' (Rapport 2017:420).

Insamlade data från juni 2017 till december 2018 har analyserats och resultaten har adderats till tidigare analyserade mätdata, se Figur 2.



Figur 2 Kvoten mellan värmekonduktiviteten i PUR och VIP

Resultaten i Figur 2 visar att efter avbrottet (under veckor 80–84) har kvoten ($\lambda_{PUR}/\lambda_{VIP}$) stabiliserats runt 4,3. Under antagandet att materialens åldring försummas, eller att åldringen av PUR och VIP är lika, så innebär detta att den termiska prestandan hos de vakuumisolerande panelerna har varit 4,3 gånger bättre än polyuretan under 220 (vecka90-310).

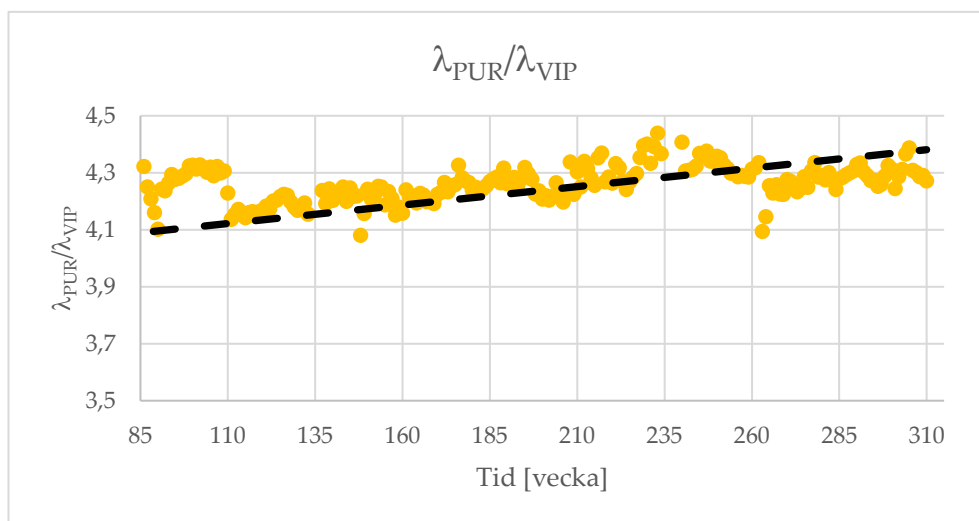
2.1.1 Vakuumisolerade panelens livslängd

Det är bevisat att hybridisolerade fjärrvärmerör med vakuumisolerade paneler reducerar värmeförlusterna från fjärrvärmerörerna med 30–40% (Rapport 2017:420). En viktig fråga är att hur länge en vakuumisolerade panel håller sin isoleringsprestanda.

Resultaten från laborietester visar att de hybridisolerade rören klarar temperaturer runt 115 °C under minst 6 år (2013–2018). I ett fjärrvärmenätverk är temperaturen mellan 80°C -120°C under uppvärmningssäsongen (5–6 månader). Under sommartider kan temperaturen vara runt 65°C. Detta innebär att livslängden för ett hybrid-isolerat fjärrvärmerör i ett nätverk kan vara mycket längre än 6 år om effekten av temperaturväxlingar är försumbara.

2.1.2 Uppskattning av de hybridisolerade rörens försämring

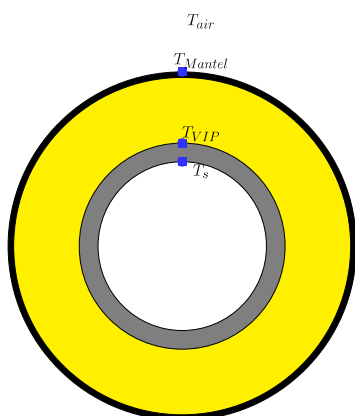
Vidare analyser av resultaten presenterade i figur 2 visar att det finns en svag ökning av kvoten $\lambda_{PUR}/\lambda_{VIP}$, se figur 3.



Figur 3 En ökande trend över tid för kvoten $\lambda_{PUR}/\lambda_{VIP}$

Relationen mellan värmekonduktiviteten hos PUR och VIP är känslig för variationer i framledningsrörets temperatur ($115 \pm 3^\circ\text{C}$) och temperaturen på mantelytan. Under vecka 210–260 (efter ett oljebyte i systemet) har temperaturen på framledningsrören varit ($118 \pm 4^\circ\text{C}$). Temperaturen på mantelytan påverkas av omgivande klimat, exempelvis temperaturen i luften, solstrålning och naturlig termisk konvektion. Ökningen av kvoten $\lambda_{PUR}/\lambda_{VIP}$ kan också förklaras med att åldringen (försämring av värmekonduktivitet) i polyuretanisoleringen är högre än försämringen av en vakuumpanelens värmekonduktivitet. För att på ett noggrant sätt kunna särskilja försämringen av konduktiviteten hos PUR och VIP bör dessa temperaturer (mantel och framledningstemperatur) vara lika i olika tidpunkter vid mätningar.

Samlade mätdata har analyserats för att hitta tidpunkter som temperaturen på framledningsrör (T_s), mantelrör (T_{mantel}) och termoelementen på baksidan av VIP (T_{VIP}) är lika, se figur 4.



Figur 4 Placering av termoelementen på framledningsrör (T_s), VIP (T_{VIP}) och mantelytan (T_{mantel}).

De tidpunkterna med de överensstämmande temperaturerna (T_s , T_{VIP} , T_{air} , T_{mantel}) presenterats i Tabell 1. Resultaten i Tabell 1 visar att temperaturerna T_s , T_{VIP} och T_{air} är lika men T_{mantel} varierar med 8%. Variationen av T_{mantel} beror på att mätuppställning vetter mot en rad fönster som släpper in solstrålning och under klara kalla nätter utsatts mätuppställning för nattutstrålning. Dessutom kan naturlig konvektion, på grund av aktiviteter i laboratoriet, störa mantelytans temperatur.

Tabell 1 Tidpunkter och temperaturer T_s , T_{VIP} , T_{air} och T_{mantel}

No	Date and time	T_s , °C	T_{VIP} , °C	T_{air} , °C	T_m , °C	Day/Night light	Weather
1	06-Feb-2013 12:58:15	113.29	59.32	20.25	22.69	Daylight	Mostly cloudy
2	06-Feb-2013 13:34:15	113.23	59.31	20.26	22.76	Daylight	Mostly cloudy
3	06-Feb-2013 13:46:15	113.26	59.31	20.16	22.80	Daylight	Mostly cloudy
4	26-Mar-2015 04:53:57	113.30	59.40	20.20	23.30	Astronomical Twilight	Light rain
5	11-Apr-2015 15:49:16	113.30	59.30	20.30	24.00	Daylight	Sunny
6	13-Apr-2015 15:49:16	113.20	59.40	20.20	24.40	Daylight	Sunny
7	01-May-2015 11:25:53	113.20	59.40	20.20	23.90	Daylight	Sunny
8	02-May-2015 09:25:53	113.20	59.40	20.20	24.30	Daylight	Sunny
9	04-May-2015 23:25:53	113.20	59.40	20.30	24.00	Astronomical Twilight	Fog
10	11-May-2015 12:25:53	113.20	59.40	20.30	24.20	Daylight	Sunny
11	13-May-2015 23:25:53	113.20	59.40	20.20	24.10	Nautical Twilight	Scattered clouds
12	09-Mar-2018 07:19:29	113.30	59.3	20.30	23.70	Daylight	Ice fog

Resultaten i Tabell 1 visar att det finns inga försämringar i den vakuumisolerade panelen. Försämringen av polyuretanets värmekonduktivitet kan vara orsaken till ökningen i kvoten $\lambda_{PUR}/\lambda_{VIP}$ om temperaturen på mantelytan inte var påverkat av omgivande parametrar. Det är också möjligt att båda materialen, PUR och VIP, försämras men försämringshastigheten hos PUR är högre än VIP. Vidare analyser utfördes för att undersöka försämringshastigheten hos respektive material. Resultaten av analyser rapporteras i Bilaga A. Slutsatsen är att om polyuretan-isolering försämras med cirka 0,75% per år då vakuumisolerings-panelernas har försämrats med 1% per år. Här bör nämnas att 4% försämring per 6 år är nästan dubbel så mycket jämförd med en normal försämring.

2.2 MÄTDATAANALYS – FÄLTSTATIONER

I dag finns fem fältstationer där det görs kontinuerliga mätningar på hybridisolerade fjärrvärmerör. Två mätstationer är placerade i Varberg, en mätstation i Göteborg, Linköping och Helsingborg. Fältstationen i Torslanda är nerlagd på grund av att de inbäddade temperatursensorerna var ur funktion.

Tabell 2: mätstationer för fältmätningar

#	Stad	Namn	startår	Dimensioner
1	Varberg	Susvindsvägen	2012	DN 2*80/250
2	Varberg	Brunnsberg	2012	DN 2*25/140
3	Göteborg	Hising Backa	2015	DN 150/280
4	Linköping	Glyttinge	2016	DN 50/140
5	Helsingborg		2018*	DN 2*150/560

* Mätstationen initierades 2018 men utrustades 2019.

Generellt är det svårare att analysera mätdata från en fältstation än laboratorie-mätningar. Det finns också andra faktorer som försvårar analysen av mätdata från fältstationerna, nämligen:

a) dessa stationer har initierats parallellt med att utvecklingen av VIP för fjärrvärmerör pågick, dvs vakuumisolerings paneler i fältstationerna är inte av samma typ, b) appliceringen av VIP runt framledningsröret kan vara olika, c) enkel eller dubbelrör används i fältstationerna,

d) framledningstemperaturer är inte lika i fjärrvärmenäten.

I denna rapport analyseras resultaten från fältstationer. Mätstationen Susvindsvägen är den äldsta station och därför är våra analyser om livstid och statusbedömning av fjärrvärmerör fokuserad på resultat från denna station.

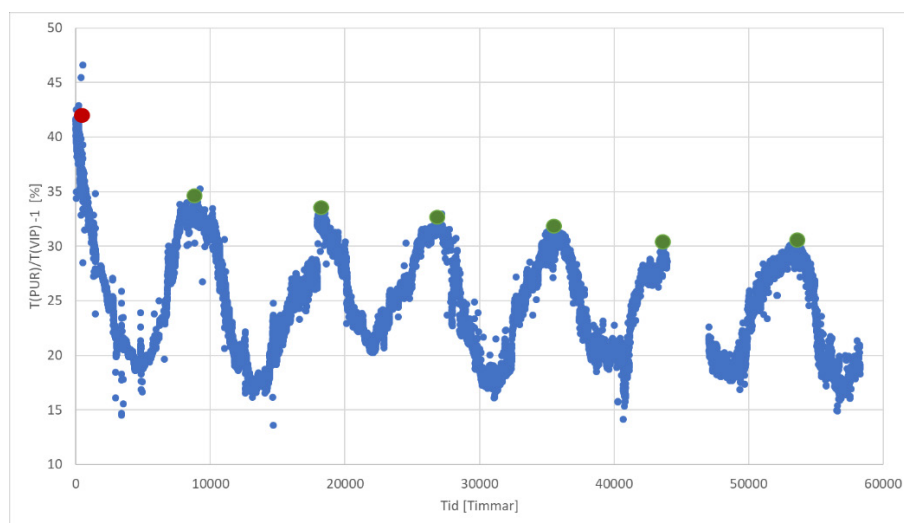
2.2.1 Susvindsvägen

Fältstationen vid Susvindsvägen initierades den 19 januari 2016. Ett dubbelrör DN2*80/250 har isolerats med vakuumisolerade paneler. Ett antal termo-element finns inbäddat i det hybridisolerade röret. Termoelementens position i röret är presenterade i Bilaga 1A och 1B. Fältstationen är den äldsta stationen för uppskattning av livslängden för hybridisolerade rör i ett fjärrvärmenätverk.

Resultat och diskussion

Generellt är termiska analyser av ett dubbelt rör väsentlig mer komplex än ett enkelrör. Analyserade mätdata från fältstationen vid Susvindsvägen har presenterats i Fjärrsyn rapport 2017:420 och i ett antal vetenskapliga artiklar. En av slutsatserna i rapporten var att 'det verkar finnas en långsam försämring av vakuumisolerade paneler över tiden men isoleringsförmågan är fortfarande bra'. Slutsatsen gäller för insamlade mätdata från början av 2012 till och med januari 2017.

För att kvantifiera försämringshastigheten har mätdata från 2012–2018 analyserats. Resultaten är presenterat i figur 5 som visa att temperaturen i polyuretanisoleringen, 10 mm från framledningsröret, ligger mellan 40-30 % högre än temperaturen på baksidan av en 10 mm vakuumpanelen.



Figur 5 Kvoten mellan temperaturen i PUR isolering och VIP isolering vid 10 mm från framledningsröret.

Mätresultaten från markerade punkter i figur 5 har presenterats i Tabell 3.

Tabell 3 Mätresultat vid 6 olika mättider, samtliga tider är relaterat till maximumtemperatur under uppvärmningssäsongen.

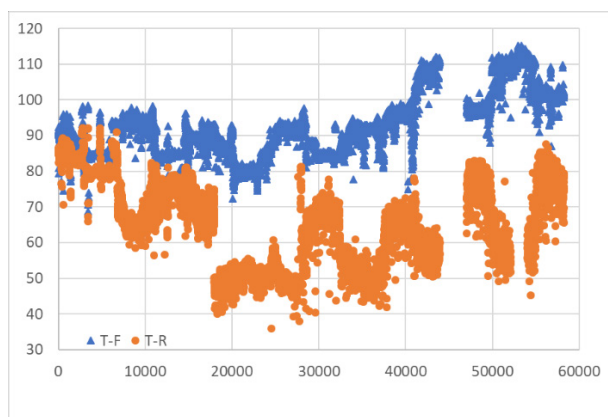
Tid [Timmar]	T-F**	T-VIP	T-PUR	T-R	T-VIP/T-F	T-PUR/T-F	*
2	92,50	49,58	69,45	86,64	0,60	0,75	40,08
9056	93,54	53,09	71,17	65,01	0,57	0,76	34,06
18 514	86,10	49,62	65,99	45,60	0,58	0,77	33,00
27 491	91,30	53,06	69,78	43,71	0,58	0,76	31,50
35 771	91,53	52,82	69,18	47,05	0,58	0,76	30,97
43 675	111,08	65,57	85,09	52,45	0,59	0,77	29,77
53 799	114,25	63,16	82,27	59,40	0,55	0,72	30,25

$*((T-PUR/T-VIP) - 1) * 100$

**T-F: Framledningstemperatur, T-VIP: Temperatur på baksidan av en 10 mm tjock isolering, T-PUR: Temperaturen i polyuretanisolering 10 mm från framledningsröret, T-R: returtemperatur

Kvoten, $((T-PUR/T-VIP) - 1) * 100$, minskar med tiden. Med antagandet att polyuretanisoleringens värmekonduktivitet inte försämras alls, visar tabellen att kvoten har minskat från 40% -30%. Detta kan tolkas att värmekonduktiviteten hos VIP har försämrats med 10% under tiden dvs, en genomsnittlig försämrings-hastighet av 1,5% per år.

Temperaturfördelning i ett fjärrvärmerör är starkt beroende av framlednings-temperaturen och returtemperaturen. Figur 6 visar variation av framlednings-temperaturen och returtemperaturen.



Figur 6 Variationen av framlednings- och returtemperaturen.

Figur 6 visar att skillnaden mellan T-F och T-R är väldigt lågt under första 7000 timmar. Detta betyder att nätverket inte har haft någon användare och

temperaturen i hela röretstvärsnitt har varit högt, runt 90–95 °C. Det vill säga vakuumpanelerna har blivit utsatta för höga temperaturer från båda sidor, ena sidan är framledningsröret och andra sidan är mellan framledningsröret och returröret. Den operativa temperaturen (hela panelen) för vakuumpanelerna i fältstationen är runt 85 °C. Medeltemperaturen av framledningen och returtemperaturen under första 7000 timmar är 85 °C, se Table 3 och Figur 6. Försämringshastigheten kommer att vara högre vid höga medeltemperaturer.

Försämringshastigheten är väsentlig lägre, under 1%, under resten av tiden (9056–53799 timmar), se figur 5 och Table 3.

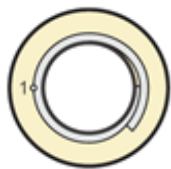
2.2.2 Hisingen

Med anledning av ett kommunalt beslut taget 1988 om förbud mot nyttillverkning av CFC-11-blåst isolering i fjärrvärmerör krävdes nya alternativa isoleringar. 1997 uppfördes därför en provanläggning i Hising Backa norr om Göteborg för test av olika lösningar som ett samarbetsprojekt mellan Göteborg Energi, Powerpipe System AB och Chalmers Tekniska Högskolan. I anläggningen testades tre rör med diametrarna 280/150 (mantel/medierör). Under 2015, ersatte 6 meter (DN150/280) befintligt fjärrvärmerör med hybridisolerade rör med VIP. Mätdatasamling påbörjades från juni-2015. Ett antal termo-element har inbäddats i det hybridisolerade röret. Termoelementens position i röret är presenterade i Bilaga 2. Syfte med mätstationen i Hisingen var att undersöka vakuumisolerade panelernas livslängd samt undersöka effekten av överlappning av vakuumisolerade panelen och köldbryggornas inverkan på den totala värmeförlusten.

I denna rapport behandlas bara livslängden av vakuumpaneler i fältstationen.

Resultat och diskussion

Provrören involverar fyra sektioner (A-D) med en 10 mm tjock vakuumisolerade panel i varje sektion, se BILAGA 2. Panelernas status har undersökts med hjälp av de uppmätta temperaturerna på baksidan av vakuumpanelen, se Figur 7, och motsvarande teoretiskt beräknade temperaturer i samma position (10 mm från framledningsröret) för polyuretanisolering och vakuumisolerade panelen.



Figur 7 Placering av termoelement på baksidan av vakuumpanel

Vid beräkningar har antagits att värmekonduktiviteten för polyuretan och vakuumisolerade panel är 0,027 respektive 0,009 W/mK. Medelvärde av temperaturskillnaden mellan beräknade temperaturen i 10 mm från framledningsröret och temperaturen på baksidan av panelen under mer än tre år, presenteras i Tabell 4.

Tabell 4 Medel temperaturskillnaden mellan polyuretanisolering och VIP

$T_{PUR} - T_{VIP} A$	$T_{PUR} - T_{VIP} B$	$T_{PUR} - T_{VIP} C$	$T_{PUR} - T_{VIP} D$	$T_{PUR}^* - T_{VIP}^* \text{beräkand}$
11,11	8,56	19,36	14,26	12,04

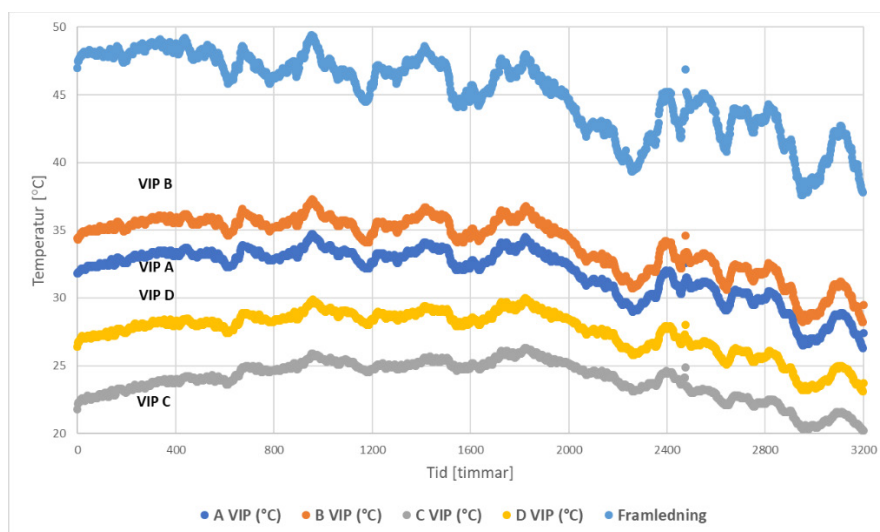
* T_{pur} och T_{vip} -beräknad är beräkningsvärde under antagande att förhållandet inuti rören är stationärt.

Ju större temperaturskillnad mellan T_{PUR} och T_{VIP} desto bättre prestanda för vakuumisoleringspaneler.

Resultaten i Tabell 4 visar att det finns stor skillnad mellan isoleringsförmågan hos vakuumpanelerna. Vakuumpaneler A och B underpresterar och vakuumpaneler 3 och 4 överpresterar i jämförelse med den beräknade temperaturskillnaden (12,04 °C).

Beräkningar visar att vakuumpanel B borde ha en värmekonduktivitet i storleksordningen 0,013–0,014 W/mK som är 50% högre än den uppskattade värdet dvs 0,009 W/mK.

Vidare analyser utfördes för att fastställa orsaken till variation i prestanda hos vakuumisolerade paneler, se Figur 8.

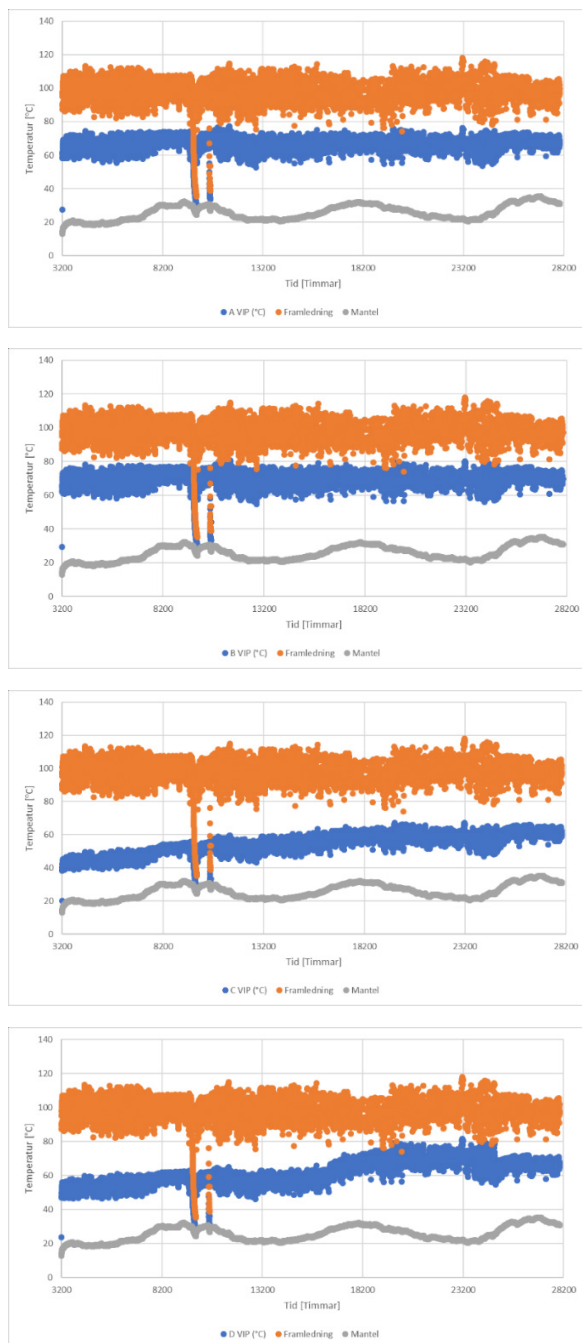
**Figur 8 Temperaturutveckling på baksidan av vakuumpaneler**

Figur 8 visar att temperaturen i framledningsröret har varit låg (40–45°C) under cirka 3200 timmar. Vakuumpanelernas prestanda är inte likartad från början av mätningarna. Den stora skillnaden i de vakuumisolerade panelernas prestanda kan bero på att panelerna A och B har blivit skadade under montering.

Temperaturen i fjärrvärmenätet höjdes till 100–110 °C från runt 40 °C efter 3200 timmar. Vakuumpanelernas beteende efter 3200 timmar presenteras i Figur 8.

Resultaten i Figur 9 indikerar att temperaturen på baksidan av de vakuumisolerade panelerna A-B är stabil under tiden och temperaturen ligger runt 60–76 °C, det vill säga att ingen av de vakuumisolerade panelernas värmekonduktivitet förändras under tiden. Temperaturen på baksidan av vakuumisolerade panelerna

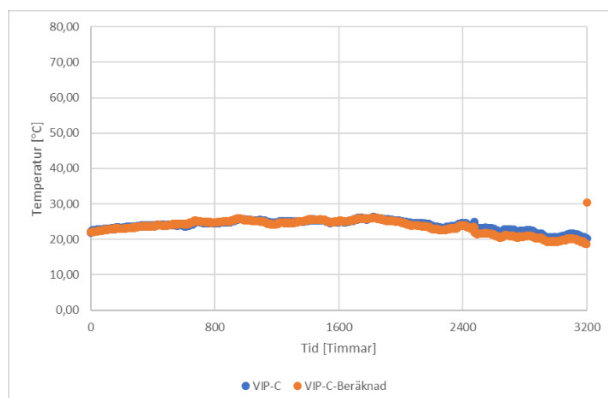
C-D ökar under tiden och detta betyder att panelerna visar tendens för en succesiv försämring av värmeisoleringsförmågan.



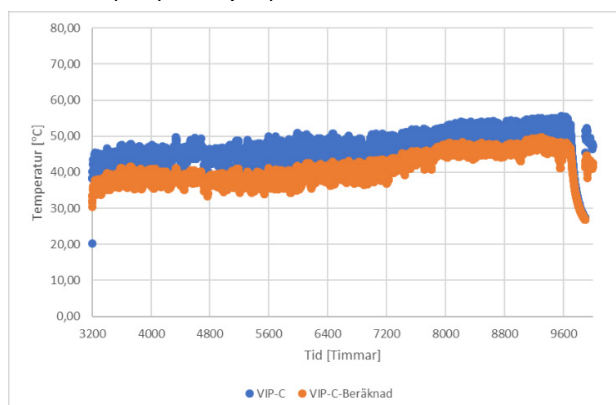
Figur 9 Temperaturen på baksidan av vakuumisolerade paneler A-D, framledningsröret och mantelröret

Beräkningar utfördes för att utforska försämringshastigheten hos vakuumisolerade panel C. Beräkningsresultaten presenteras i Figur 10. Under första 3200 timmar stämmer det termiska beteendet av panel C väldigt bra med de beräknade värdena. Den beräknade värmeledningsförmågan för en överlappad vakuumisolerade panel var 0,0025 W/mK som är nästan 50% bättre än det

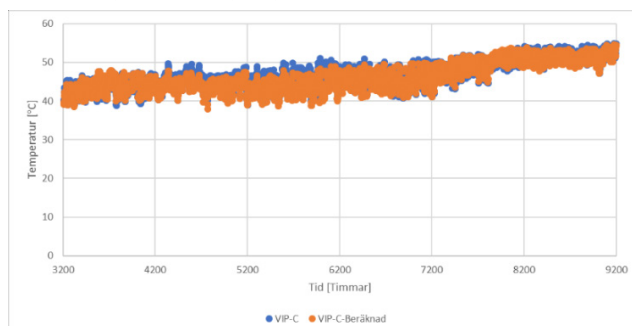
deklarerade värdet av tillverkaren. Efter 3200 timmar, när temperaturen i framledningsröret höjs från 40°C till runt 100°C. Det finns en tydlig skillnad mellan de uppmätta och de beräknade temperaturer med antagandet att panelens värmekonduktivitet ligger på samma nivå (0,0025 W/mK), se figur 11. Temperaturmätningar på baksidan av panelen och beräknade temperaturer överensstämmer om beräkningar utförs med en värmekonduktivitet för paneler av storleksordningen 0,0036 W/m.K, se figur 12.



Figur 10 Temperaturen på baksidan av panelen C, jämförelse mellan mät- och beräkningsvärde vid tidsintervall, $\lambda=0,0025$ W/mK, tidsintervall 0–3200 timmar.



Figur 11 Temperaturen på baksidan av panelen C, jämförelse mellan mät- och beräkningsvärde vid tidsintervall, $\lambda=0,0025$ W/mK, tidsintervall 3200–9600 timmar.



Figur 12 Temperaturen på baksidan av panelen C, jämförelse mellan mät- och beräkningsvärde vid tidsintervall, $\lambda=0,0036$ W/mK, tidsintervall 3200–9600 timmar.

Beräkningar för tidsintervallet 9200–28000 timmar visade att värmekonduktiviteten hos den vakuumisolerade panelen skulle vara 0,0055 W/mK för att mätdata och beräkningsresultat skulle stämma.

Slutsatser- Hisingsbacka fältstation

Fyra vacuumisolerade paneler är installerade på ett enkelrör DN 150/280. Två av panelerna (A-B) har troligen blivit skadade under monteringsprocessen. De andra panelerna (C-D) uppvisade mycket bättre prestanda än förväntat i början av mätningar (0–3200 timmar) när temperaturen i framledningsröret är 40°C. Efter ett par kraftiga temperaturändring (från 40°C till runt 100°C) i fjärrvärmenätet börjar panelernas prestanda försämrars med 0,0009 W/mK/år.

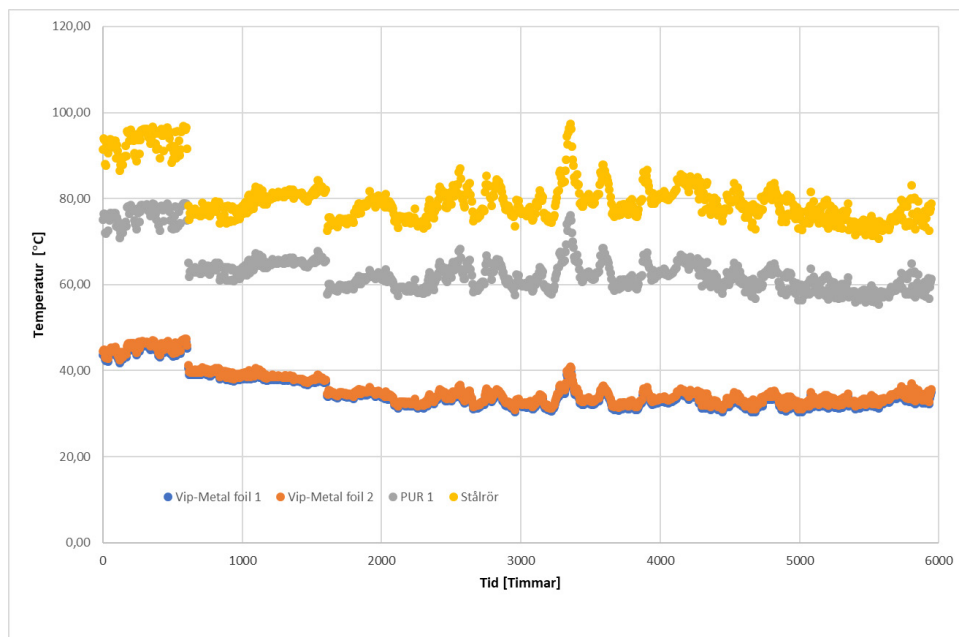
En helt punkterad vakuumisolerad panel har en värmekonduktivitet runt 0,020–0,022 W/mK. Med en linjärförsämringstakt av 0,0009 W/mK/år uppskattas livslängden på panelen (C-D) i Hisingsbacka vara cirka 24 år.

2.2.3 Linköping

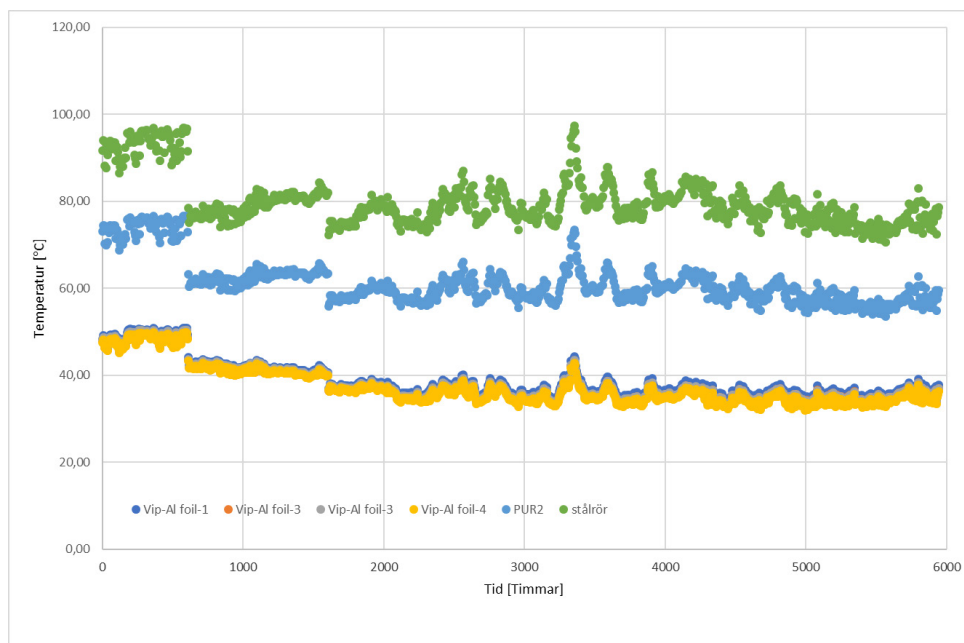
Utveckling och undersökning av vakuumpaneler pågick, under 2012–2016, för att optimera vakuumisolerade paneler för isolering av fjärrvärmerör. Det finns två olika typer av det yttersta skiktet omsluter hela panelen, som uppfyller fukt och lufttätthet funktionen för panelen. Luft- och fuktbarriären kan innehålla tunna skikt av aluminium eller metalliserade aluminiumskikt. Fältstationen i Linköping initierades 2016. Ett 6 meter långt fjärrvärmerör, DN 50/140, var isolerad med fyra vakuumisolerade paneler. Luft och fuktbarriären i två av dessa paneler tillverkades av tunna skikt av aluminium och två paneler var av typen metalliserat aluminiumskikt. Ett antal termo-element har inbäddat i det hybridisolerade röret. Termoelementens position i röret är presenterat i Bilaga 3.

Resultat och diskussion

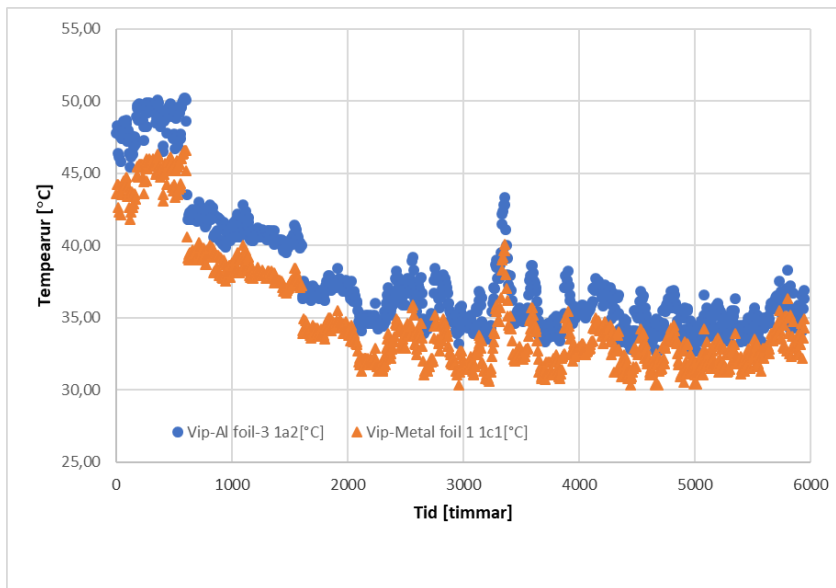
Provrören involverar fyra sektioner (A-D) med en 10 mm tjock vakuumisolerad panel i varje sektion, se BILAGA 3. Panelernas status har undersökts med hjälp av de uppmätta temperaturerna på baksidan av vakuumpanelen och motsvarande teoretisk beräknade temperaturer i samma position (10 mm från framledningsröret) för polyuretanisolering och vakuumisolerade panelen. Vid beräkningar har antagits att värmekonduktiviteten för polyuretan och vakuumisolerade panelen är 0,027 respektive 0,006 W/mK. Resultaten presenteras i figurerna 13–15.



Figur 13 Temperaturen på baksidan av de vakuumisolerade panelerna, metalliserad folie, paneler 1–2 (runt 40 °C), framledningsröret (runt 80 °C) och beräknade temperaturer på polyuretan (runt 60 °C).



Figur 14 Temperaturen på baksidan av de vakuumisolerade panelerna, aluminiumfolie, paneler 3–4 (runt 40 °C), framledningsröret (runt 80 °C) och beräknad temperaturer på polyuretan (runt 60 °C).



Figur 15 Temperaturen på baksidan av de vakuumisolerade panelerna med aluminium-folie och med metalliserad folie.

Resultaten från mätningar och beräkningar vid fältstationen i Linköping visar att vakuumpanelerna, oavsett vilken typ av barriär, uppfyller sin funktion och värmeisoleringsförmågan hos vakuumpaneler är 4 gånger bättre än hos polyuretanisolerings. Detta betyder att värmeförlusterna i hybridisolerade DN50/140 är 50% lägre i jämförelse med ett konventionellt isolerat fjärrvärmerör.

Resultaten visar också att en metalliserad folie har bättre isoleringsförmåga än en aluminiumfolie, se figur 15. Beräkningar visar att den effektiva värme-konduktiviteten för en metalliserad folie (5,3 W/m/K) är 10–15% lägre än aluminiumfolie (6,5 W/mK). Användning av aluminiumfolie leder till kraftigare köldbryggor och detta leder till att den effektiva värmeledningsförmågan försämras.

Normalt vet man att livslängden på en vakuumisolerande panel med aluminiumfolie är längre än en med metalliserad folie. Fältstationen i Linköping initierades i augusti-2016. Det är för tidigt att kunna dra slutsatser om livslängden av vakuumisolerade paneler.

2.3 HELSINGBORG

Fältstationen i Helsingborg initierades januari-feb 2018. Ett antal termoelement blev skadade vid montering av rören. Fältstationen kompletterades med de nödvändiga mätutrustningarna under jan-feb 2019. Första mätdata skall samlas i mitten av april 2019. Ett 6 meter långt fjärrvärmerör, DN 2*150/560 var isolerat med vakuumisolerande paneler. Ett antal termo-element finns inbäddat i det hybridisolerade röret. Termoelementens position i röret finns presenterat i Bilaga 4.

Resultat och diskussion

Inga resultat är tillgänglig än.

3 Slutsatser

En helt punkterad vakuumisolerande panel har en värmekonduktivitet runt 0,020–0,022 W/mK som är 10–15% bättre än polyuretanisoleringens värmekonduktivitet vid 50 grader. I denna rapport beräknas livslängden på en vakuumisolerande panel med hänsyn till att den är helt punkterad.

Slutsatsen från mätningar i laboratorium är att försämringshastigheten är obefintlig eller med antagandet att polyuretanisolering försämras med cirka 4% per 6 år, då vakuumisoleringspanelernas värmekonduktivitet kan försämrats med 1% per år. Därmed kommer livslängden på paneler vara 100 år.

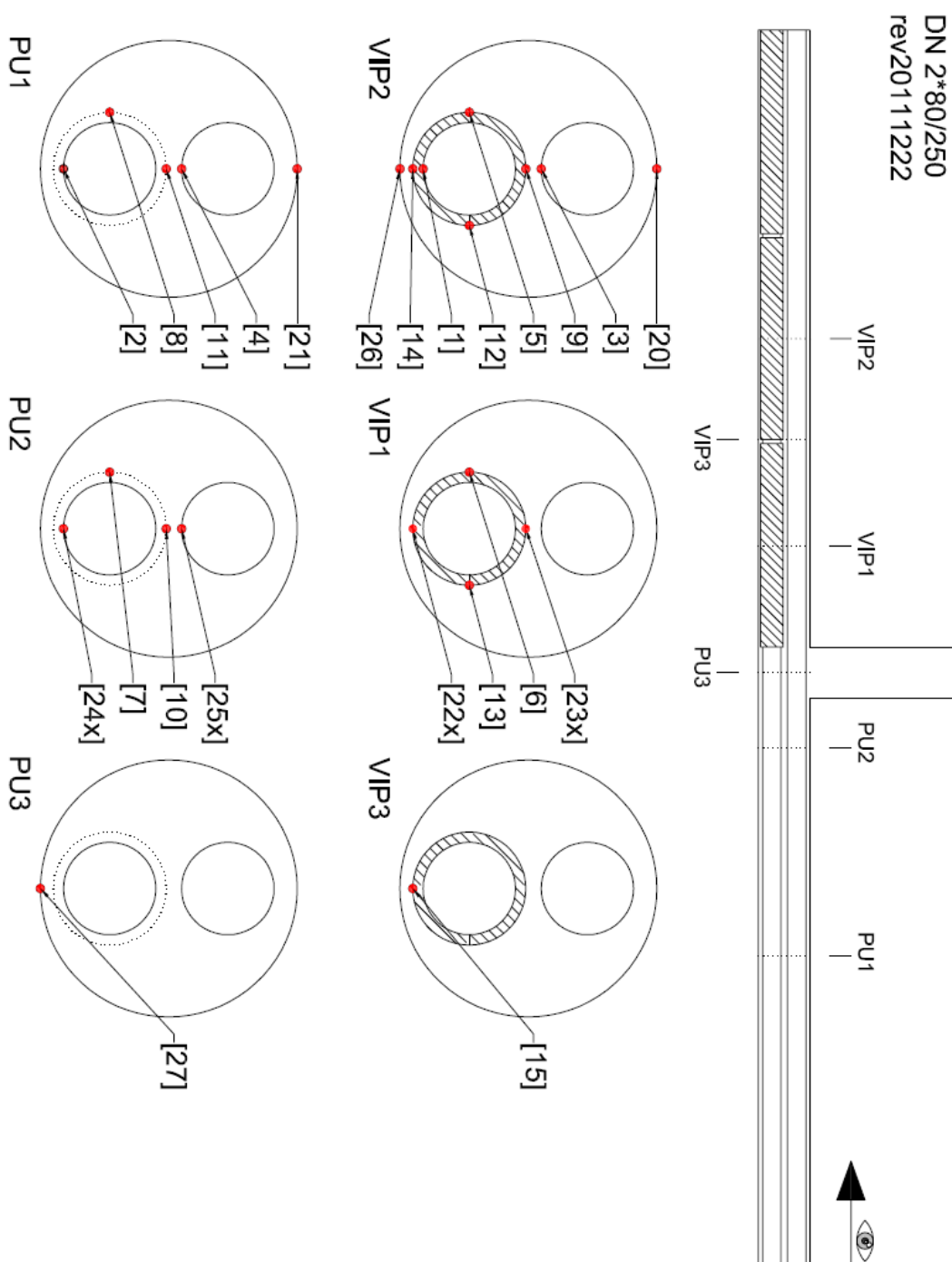
Resultaten från fältstationen 'Susvind' visar att försämringshastigheten av vakuumpanelernas värmekonduktivitet kan vara maximum 1,5% per år. Detta innebär att vakuumpanelerna i fjärrvärmerör kan ha en livslängd på runt 70 år. Antaganden om polyuretanisoleringens åldring medför en underskattning av livslängden för hybridisolerade fjärrvärmerör.

En metalliserad folie har bättre isoleringsförmåga än en aluminiumfolie men livslängden på en vakuumisolerande panel med aluminium-folie är längre än en metalliserad folie.

Resultaten från fältstationen 'Hisingsbacka' visar att vakuumisolerade paneler var skadade. Vakuumisolerade paneler i denna fältstation hade monterats med en förlängd överlappning. Överlappningen av vakuumisolerade paneler kan vara anledningen till skadan. Skadan har troligen skett under montering eller på grund av stora termiska rörelser i den överlappande sektorn. Den uppskattade livslängden för vakuumisolerade paneler i denna station är 24 år.

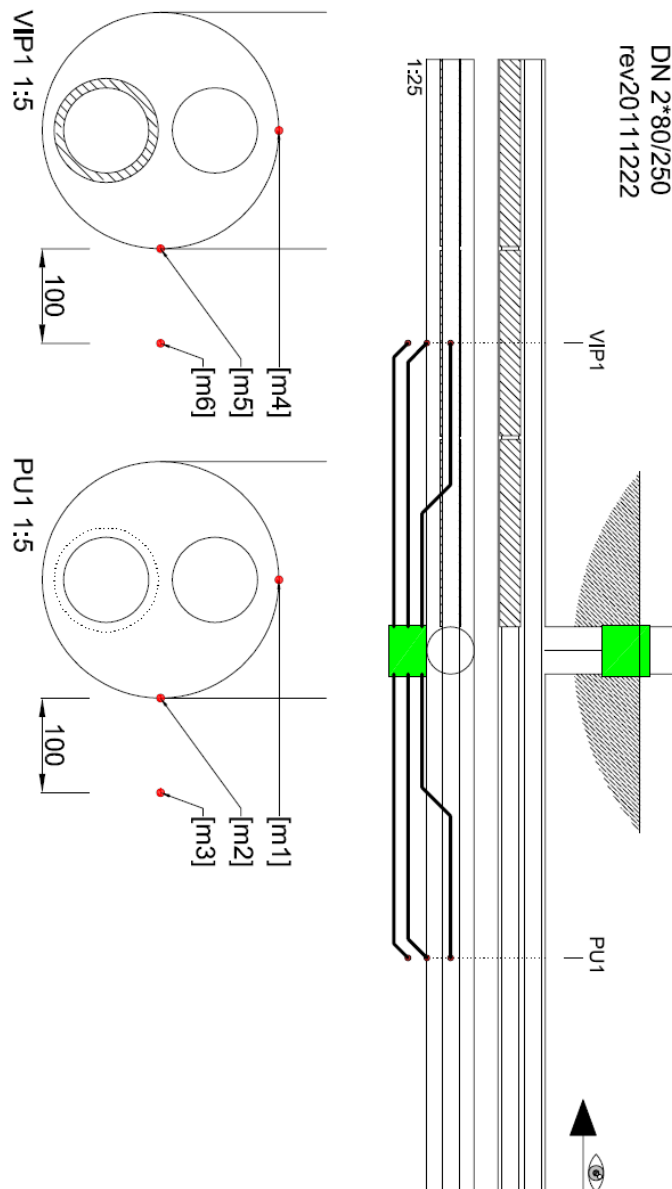
BILAGA 1.A. Station Susvindsvägen

Station Susvindsvägen, fjärrvärmerör med termoelementplacering och termoelementnummer. Fjärrvärmerörets längd är cirka 6 meter. 3 meter av röret isolerades med 3 vakuumisolerade paneler.



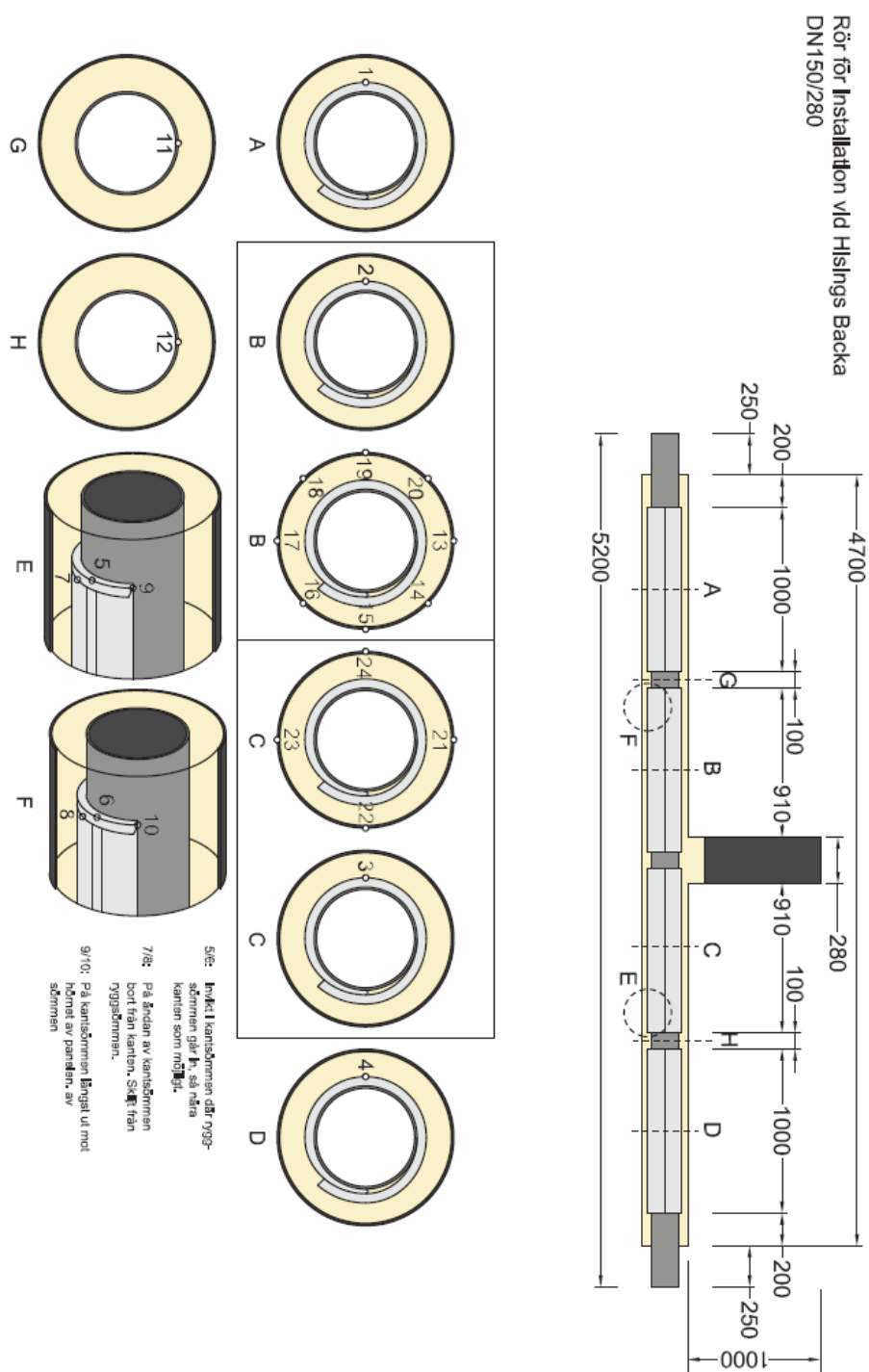
BILAGA 1.B. Station Susvindsvägen

Station Susvindsvägen, fjärrvärmerör med termoelementplacering och termoelementnummer. Fjärrvärmerörets längd är cirka 6 meter. 3 meter av röret isolerades med 3 vakuumisolerade paneler. 'm' är förkortningen av mantelrör.



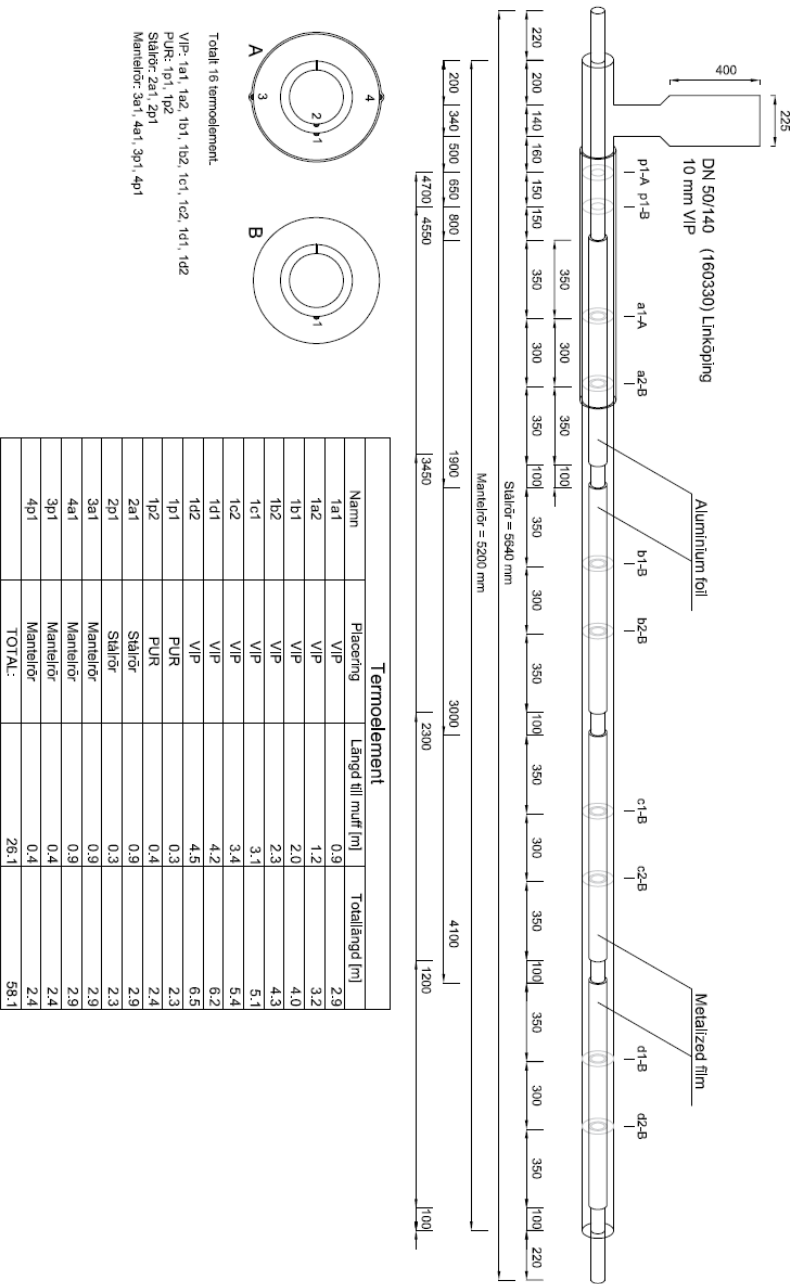
BILAGA 2. Station Hisingsbacka

Station Hisingsbacka, fjärrvärmerör med termoelementplacering och termoelementnummer. Fjärrvärmerörets längd är cirka 4,7 meter. 4 meter av röret isolerades med 3 vakuumisolerade paneler.



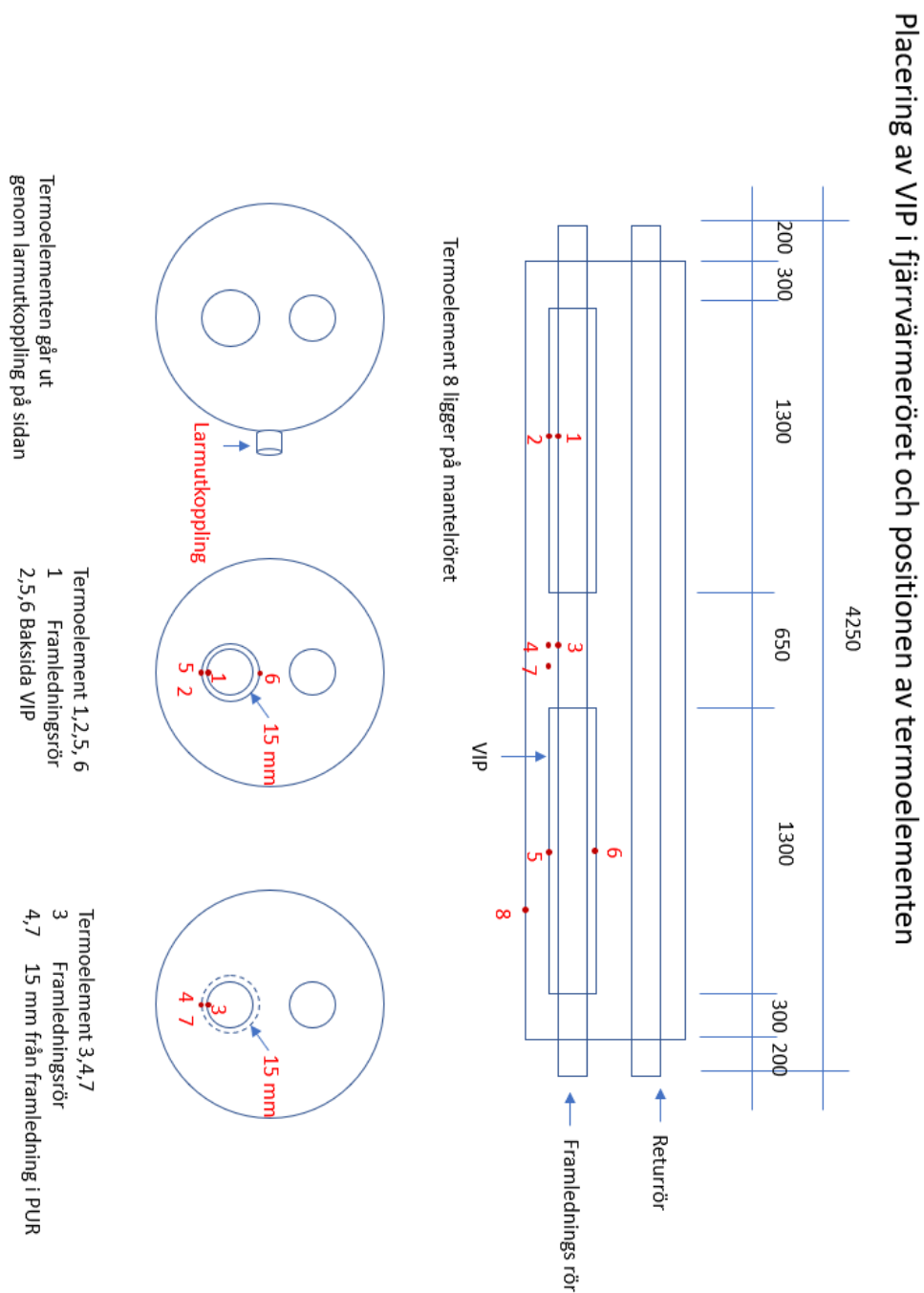
BILAGA 3. Station Linköping

Station Linköping, fjärrvärmerör med termoelementplacering och termoelementnummer. Fjärrvärmerörets längd är cirka 5,2 meter. 4 meter av röret isolerades med 2 typer av vakuumisolerade paneler.



BILAGA: 4: Station Helsingborg,

Station Helsingborg, fjärrvärmerör med termoelementplacering och termoelementnummer. Fjärrvärmerörets längd är cirka 4 meter. 2,6 meter av röret isolerades med vakuumisolerade paneler.



BILAGA: A: Hybrid Insulated Pipes at Laboratory Evaluation of lifetime

Hybrid Insulated Pipes at Laboratory

Evaluation of lifetime

Alireza Marzbanrad

Bijan Adl-Zarrabi

January 2019

1. Goal of the project

The goal of the project is to estimate the long-term thermal performance of the hybrid insulated pipes where Vacuum Insulation Panel (VIP) is wrapped around the supply pipes of the district heating system. The hybrid insulated pipes were fabricated by replacing about 10 mm of PUR with VIP. There are three sets of the hybrid single pipes at the laboratory and five sets of the hybrid double pipes in the field.

The aim of this report is to analyze the data of the thermocouples which have been recording temperatures of different points of the pipes at a certain time step and calculate the deterioration of the PUR and VIP. Furthermore, the long-term thermal performance and energy gain of the hybrid insulated pipes is estimated to compare them with the common version of the pipes which are used in the district heating systems.

2. Methodology

Single Pipe

Results of the measurements at SP-laboratory show that after the setup has just started, it takes a short period of time that the temperature at each point of the pipe is raised to the certain value and there is only small fluctuation from the constant level of temperature. Hence, it is possible to select time windows where quasi steady state condition is preserved. By the assumption of the steady state condition, the thermal network of the pipe can be modeled by considering nodes which represent the temperatures at steel pipe, backside of the VIP in the boundary of VIP and PUR, outside of the mantel, room temperature and the conductances between the nodes. See Figure

1. Thermal conductivity of VIP and PUR depends on temperature of the material

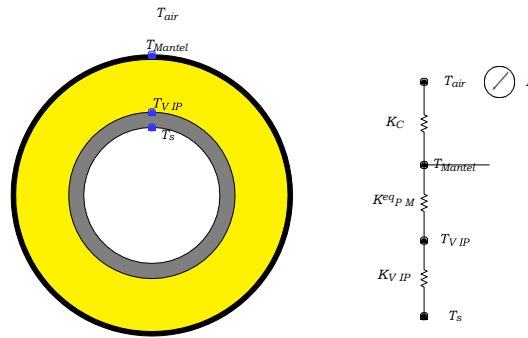


Figure 1: *Thermal network of the single pipe at steady state condition*

and their age. Equation 1 is used to calculate the PUR temperature dependent thermal conductivity in this project. In order to evaluate the aging of PUR and VIP, data of different time steps with considerable time distances are selected where

the temperatures of steel pipe, T_s , VIP, T_{VIP} , and air, T_{air} , of each time step are almost equal to the others. The selected sets of data makes it possible to calculate the thermal conductivity of the VIP and PUR at the mean temperature of their boundaries. The temperature of the mantel will vary but mean temperature of PUR will remain very close. As a result, by considering the contribution of the mean temperature of the PUR at its thermal conductivity (Equation 2), the assumption of being independent of temperature for the thermal conductivity of PUR is valid.

$\lambda_{PUR} = \lambda_{PUR}^{50} + 0.00012(T - 50)$	(1)
--	-----

Where λ^{50} is thermal conductivity of the PUR at the mean temperature of 50°C.

Equation 1 is valid for any position of the PUR area. This equation is linear, therefore, at each section of the pipe, the equation 1 is valid when the average of the temperatures of each point of the PUR is used to calculate the overall thermal conductivity of the PUR. Here, the temperatures of the boundaries are provided by sensors and we use them to calculate the average temperature of the PUR, T_{ave} . Using T_{ave} in equation 1 gives:

$\bar{\lambda}_{PUR} = \lambda_{PUR}^{50} + 0.00012(T_{ave} - 50)$	(2)
--	-----

Where $\bar{\lambda}_{PUR}$ is the overall thermal conductivity of the PUR in the section of the thermocouples and T_{ave} is equal to the mean temperature of the boundaries of the PUR.

It should be noted that the solar radiation has influence on mantel temperature. It is denoted by heat flow, I_r , in Figure 1. Therefore, the weather condition of each point is inspected to eliminate the points which are suspected to get considerable influence from solar radiation. As the laboratory pipes are not located in an isolated room and there are other ongoing activities in the lab the time steps at which there is no activity in lab (like holidays and off-hours) are more of interest to assess the thermal conductivity. It helps to minimize the effect of the daily activities on heat convection coefficient.

In order to evaluate the steady state condition at the selected point, an interval, in which the selected point is located, is investigated. In the interval, time steps before and after the selected point is checked the existence of any dramatic change. In case, there are no drastic changes in temperatures, the steady state condition can be verified. If of the steady state condition is approved, the steady state heat transfer equations for the thermal network at the selected time steps are:

$K_{PUR} = \frac{2\pi\bar{\lambda}_{PUR}}{\ln\left(\frac{r_m - t_m}{r_{VIP}}\right)}$	(3)
---	-----

$K_m = \frac{2\pi\lambda_m}{\ln\left(\frac{r_m}{r_m - t_m}\right)}$	(4)
$K_{PM}^{eq} = \frac{K_m K_{PUR}}{K_m + K_{PUR}}$	
$\rightarrow K_{PM}^{eq} = \frac{2\pi\lambda_m \bar{\lambda}_{PUR}}{\lambda_m \ln\left(\frac{r_m - t_m}{r_{VIP}}\right) + \bar{\lambda}_{PUR} \ln\left(\frac{r_m}{r_m - t_m}\right)}$	(5)
$K_{VIP} = \frac{2\pi\lambda_{VIP}}{\ln\left(\frac{r_{VIP}}{r_s - t_m}\right)}$	(6)
$K_{VIP1}(T_{s1} - T_{VIP1}) = K_{PM1}^{eq}(T_{VIP1} - T_{m1})$	(7)
$K_{VIP2}(T_{s2} - T_{VIP2}) = K_{PM2}^{eq}(T_{VIP2} - T_{m2})$	(8)

Where

r_m outer radius of the mantel
 t_m thickness of the mantel r_v
 r_{VIP} outer radius of the VIP r_s
 r_s outer radius of steel pipe
 T_s temperature of the steel pipe
 T_m temperature of the mantel
 T_{VIP} temperature of the backside of the VIP

Referring to the fact that we selected the points at two different time steps, $t = t_1$ and $t = t_2$, at which $T_{s1} = T_{s2}$, $T_{VIP1} = T_{VIP2}$ and consequently the VIP conductances are equal. Therefore, equations 7 and 8 can be rewritten as:

$K_{VIP}(T_s - T_{VIP1}) = K_{PM1}^{eq}(T_{VIP} - T_{m1})$	(9)
$K_{VIP}(T_s - T_{VIP2}) = K_{PM2}^{eq}(T_{VIP} - T_{m2})$	(10)

Adl-zarrabi [1] shows that if the PUR thermal conductivity assumed to be constant, then the degradation of the VIP would not be resulted, and results show the tendency of better performance of the VIP over a long time. Hence, a comprehensive solution should investigate the aging of both PUR and VIP insulations. To model the aging impact on the thermal conductivity of PUR, the term λ^{50} in the equation 2 is replaced by $\lambda_0 - se^{ht}$. So, the equation 2 is rewritten as:

$\lambda_{PUR} = \underbrace{(\lambda_0 - se^{-ht})}_{\text{Aging contribution to } \lambda^{50}} + \underbrace{0.00012(T_{ave} - 50)}_{\text{Contribution of the side walls temperatures}}$	(11)
--	------

By calculating the fraction of $K^{eq}_{PM2}/K^{eq}_{PM1}$ and using the equation 11 for the thermal conductivity of the PUR, it is possible to calculate the variables λ_0 , s and h when appropriate time steps are provided. The set of two equations and three unknowns can be solved iteratively. Finally, the results will be used to compare the thermal conductivity of VIP in different time steps.

3. Laboratory Measurements

Pipe A

Single straight pipe from the Power Pipe production is used. The dimensions of the pipes are presented in the Table 1.

Table 1: *Pipe Dimensions*

r_m (mm)	t_m (mm)	VIP thickness (mm)	r_s (mm)
225.5	3.7	10	114.5

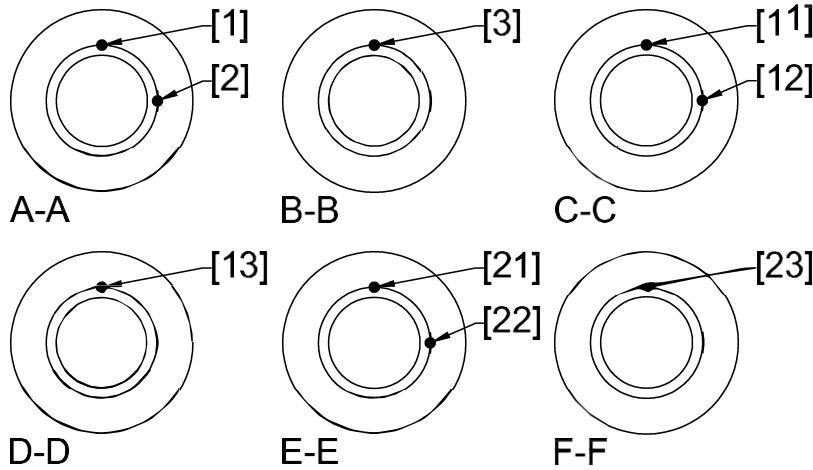
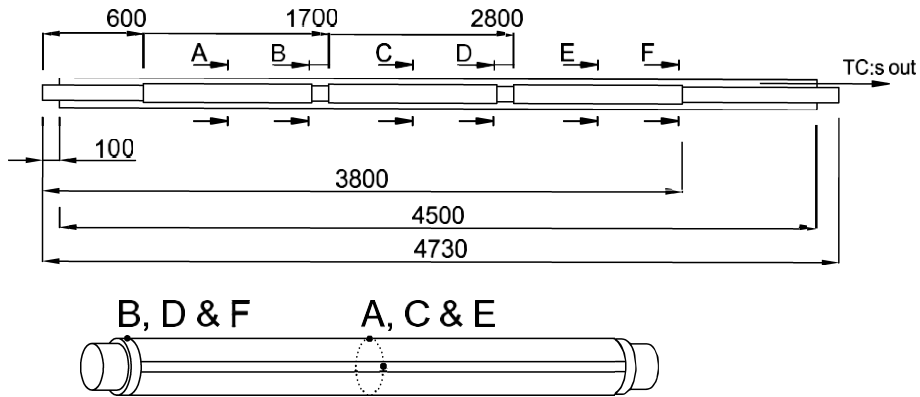


Figure 2: *Arrangement of the thermocouples in Pipe A*

The arrangement of the thermocouples is shown in Figure 2. There are two sets of thermal bridges occur in the setup. There are thermal bridges occur at the junctions between VIP and PUR at sections B, D and E. Thermocouples 3, 13 and 23 give data of the corresponding thermal bridges. The other position which leads to thermal bridge is the overlap point of the VIP. The data of these points are provided by thermocouples 2, 12 and 22. Thus, in analysis to calculate the thermal conductivity of the VIP sensors 1, 11 and 21 were used. Figure 3 shows the records of

the temperatures of the room, mantel, steel pipe and the sensors since the beginning of the measurements.

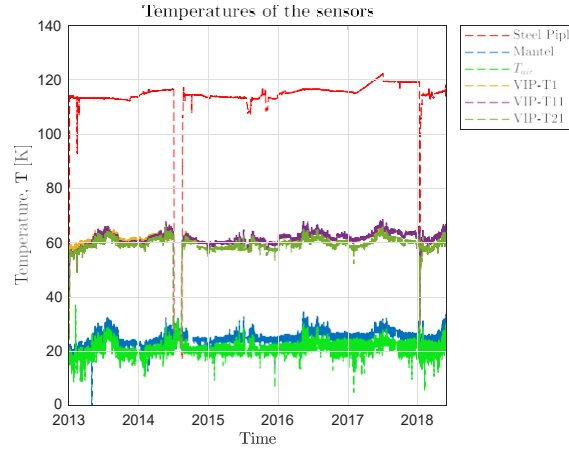


Figure 3: *Measured temperatures at selected positions for the pipe A*

Following the solution that is introduced at 0.3.1, the series of time steps which have a highest time difference between the first and last data is found and represented in the Table 2. The type of the light at the recorded time and the weather conditions of the corresponding date and time are added to the last two columns.

Table 2: *The selected data set with the same steel pipe, same VIP and the same room temperatures*

No	Date and time	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_{VIP}, ^\circ\text{C}$	$T_{air}, ^\circ\text{C}$	$T_m, ^\circ\text{C}$	Day/Night light	Weather
1	06-Feb-2013 12:58:15	113.29	59.32	20.25	22.69	Daylight	Mostly cloudy
2	06-Feb-2013 13:34:15	113.23	59.31	20.26	22.76	Daylight	Mostly cloudy
3	06-Feb-2013 13:46:15	113.26	59.31	20.16	22.80	Daylight	Mostly cloudy
4	26-Mar-2015 04:53:57	113.30	59.40	20.20	23.30	Astronomical Twilight	Light rain
5	11-Apr-2015 15:49:16	113.30	59.30	20.30	24.00	Daylight	Sunny
6	13-Apr-2015 15:49:16	113.20	59.40	20.20	24.40	Daylight	Sunny
7	01-May-2015 11:25:53	113.20	59.40	20.20	23.90	Daylight	Sunny
8	02-May-2015 09:25:53	113.20	59.40	20.20	24.30	Daylight	Sunny
9	04-May-2015 23:25:53	113.20	59.40	20.30	24.00	Astronomical Twilight	Fog
10	11-May-2015 12:25:53	113.20	59.40	20.30	24.20	Daylight	Sunny
11	13-May-2015 23:25:53	113.20	59.40	20.20	24.10	Nautical Twilight	Scattered clouds
12	09-Mar-2018 07:19:29	113.30	59.3	20.30	23.70	Daylight	Ice fog

If the date and time of the first record of data is set to zero hours as the starting point and calculate the time interval of the data of each row with the starting point in hours, the temperature of mantel temperature of the data set with respect to time (in hours) can be shown as Figure 4.

Three points were selected for further analysis from Table 2 and shown in Figure 4 with the circles which were filled with red stars. The points are corresponding to the rows 1, 4 and 12.

Among the first three rows, the first row was selected where the mantel got less influence from the radiation (although the weather was cloudy and not a major effect

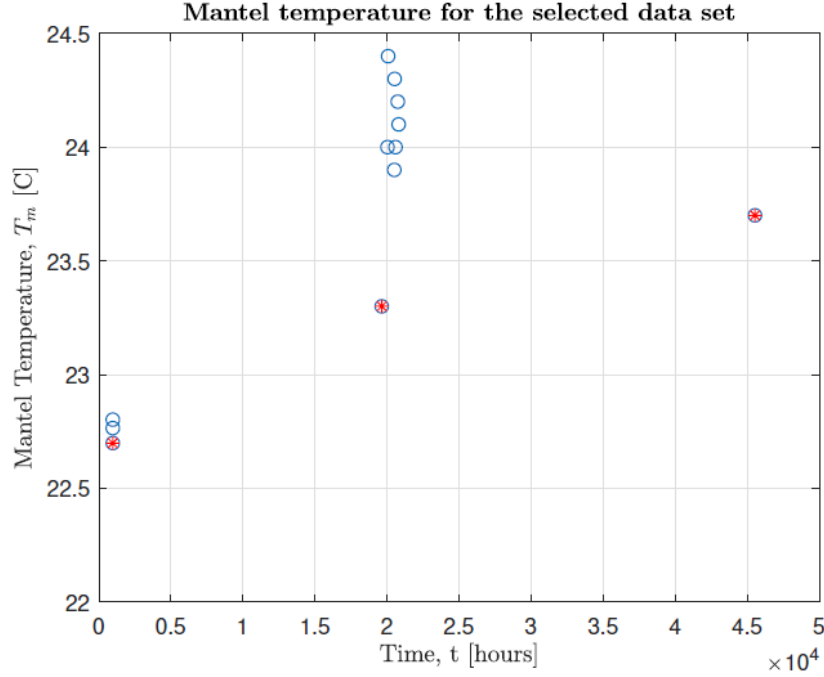


Figure 4: *Temperature of the mantel for the data set of Table 2 when same steel pipe, same VIP and the same room temperatures happens at each time step. The points which are marked with red star are the points used for further analysis.*

was expected from solar radiation).

Data of the rows 5, 6, 7, 8 and 10 could be ignored because of solar radiation influence on the mantel temperature. As we know, sky cooling happens during nights, especially during cold non-cloudy nights. When there is a cloudy sky, sky cooling (long wave radiation from objects to the sky) will be less. Therefore, at nights with fog or cloudy sky, it is probable to get a higher temperature inside the building. However, if the nights are much colder (resulting in ice fog), the temperature will be less than other nights. So, we ignore the data of rows 9 and 11.

Referring section 0.3.1, in the next step the steady state condition of an interval which contains each selected point is evaluated.

Point 1. Figure 5 shows the variation of the steel pipe, VIP, mantel and room temperature between 959.9 hours (06-Feb-2013 10:58:15) to 963.9 hours (06-Feb-2013 14:58:15).

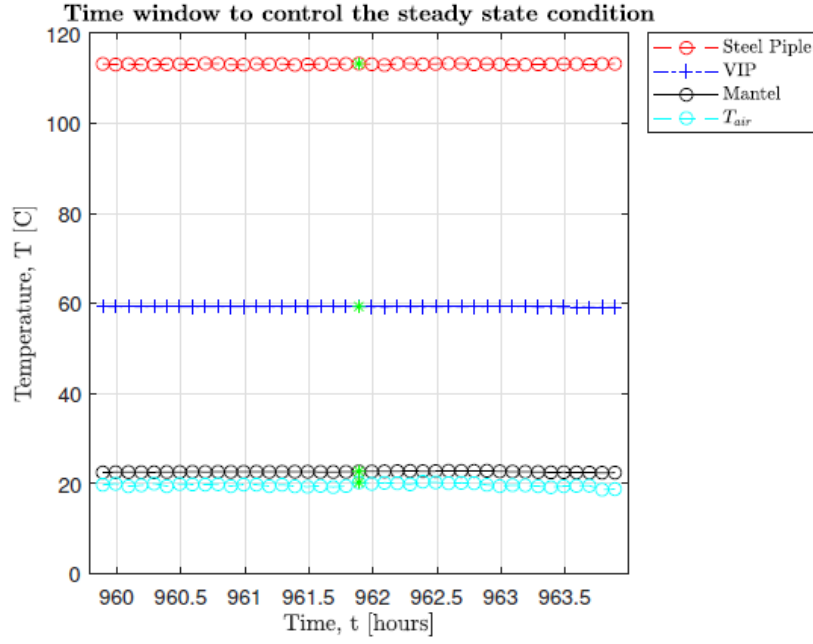


Figure 5: *Temperatures in a time window of 4 hours where the first row of the Table 2 is located at the center*

Table 3: *Temperature variations in an interval including 06-Feb-2013 12:58:15.*

	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_{VIP}, ^\circ\text{C}$	$T_m, ^\circ\text{C}$	$T_{air}, ^\circ\text{C}$
Min	112.97	59.17	22.41	18.64
Max	113.30	59.38	22.83	20.42
Difference	0.33	0.21	0.42	1.78

The maximum temperature difference of the interval is regarding the room temperature which is in the reasonable range and the assumption of steady state condition is valid for the interval.

Point 4. Figure 6 shows the variation of the steel pipe, VIP, mantel and room temperature between 19606 hours (25-Mar-2015 08:53:57) to 19646 hours (27-Mar-2015 00:53:57).

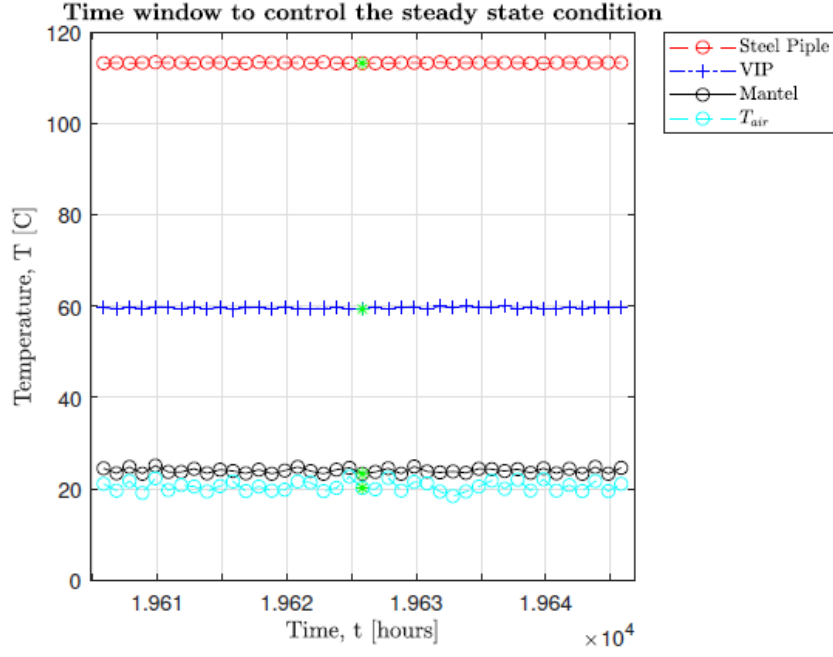


Figure 6: *Temperatures in a time window of 40 hours where the fourth row of the Table 2 is located at the center*

Table 4: *Temperature variations in an interval including 26-Mar-2015 04:53:57.*

	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_{VIP}, ^\circ\text{C}$	$T_m, ^\circ\text{C}$	$T_{air}, ^\circ\text{C}$
Min	113.30	59.30	23.30	18.40
Max	113.50	60.00	25.10	22.70
Difference	0.20	0.70	1.80	4.30

The maximum temperature difference of the interval is regarding the room temperature. There is not any dramatic change between to consecutive points of the interval. So, the assumption of steady state condition is valid.

Point 12. Figure 7 shows the variation of the steel pipe, VIP, mantel and room temperature between 45504 hours (08-Mar-2018 11:19:29) to 45544 hours (10-Mar-2018 03:19:29).

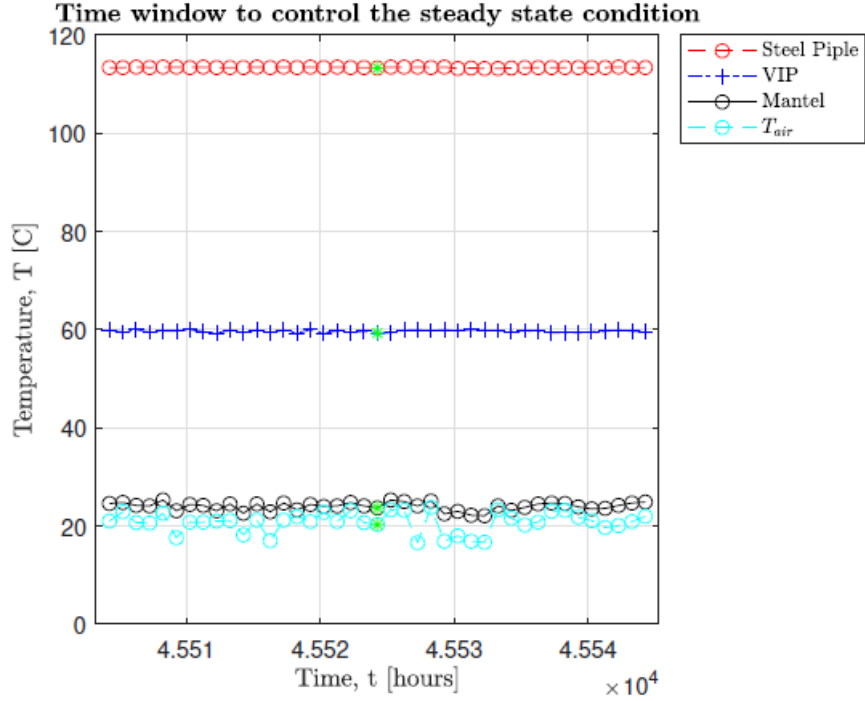


Figure 7: Temperatures in a time window of 40 hours where the twelfth row of the Table 2 is located at the center

Table 5: Temperature variations in an interval including 09-Mar-2018 07:19:29.

	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_{VIP}, ^\circ\text{C}$	$T_m, ^\circ\text{C}$	$T_{air}, ^\circ\text{C}$
Min	113.20	59.30	22.10	16.60
Max	113.50	60.00	25.30	23.80
Difference	0.30	0.70	3.20	7.20

The maximum temperature difference of the interval is regarding the room temperature which is in the reasonable range which means that there is no outlier in the selected interval. Therefore, assumption of steady state condition is valid for the interval.

The term reasonable range which is used in the analysis of the Tables 3 to 5 should be more elaborated. It is shown that the variation of air temperature, for example in Table 5, 16.6 °C to 23.8 °C, has not a considerable contribution to the VIP and supply temperature, with the variation of 0.7 °C and .3 °C. It is the same in the case of mantel temperature. This conclusion is given from all of the sensitivity analysis in Tables 3 to 5.

None of the drastic jumps of the Figure 3 are located in the three intervals which are presented at Figures 5, 6 and 7. Hence, we can step forward to the next step of the analysis following the 0.3.1. Using equations 9 and 10 and the indices of the rows in Table 2, we have:

$\frac{K_{VIP4}(T_{s4} - T_{VIP4})}{K_{VIP1}(T_{s1} - T_{VIP1})} = \frac{K_{PM4}^{eq}(T_{VIP4} - T_{m4})}{K_{PM1}^{eq}(T_{VIP1} - T_{m1})}$	
$\frac{K_{VIP12}(T_{s12} - T_{VIP12})}{K_{VIP4}(T_{s4} - T_{VIP4})} = \frac{K_{PM12}^{eq}(T_{VIP12} - T_{m12})}{K_{PM4}^{eq}(T_{VIP4} - T_{m4})}$	

and $T_{s1} = T_{s4} = T_{s12}$, $T_{VIP1} = T_{VIP4} = T_{VIP12}$ result in $K_{VIP1} = K_{VIP4} = K_{VIP12}$, so:

$\frac{K_{PM4}^{eq}}{K_{PM1}^{eq}} = \frac{(T_{VIP1} - T_{m1})}{(T_{VIP4} - T_{m4})}$	(12)
$\frac{K_{PM12}^{eq}}{K_{PM4}^{eq}} = \frac{(T_{VIP4} - T_{m4})}{(T_{VIP12} - T_{m12})}$	(13)

Using the expression for K_{PM}^{eq} and applying the Equation 11 and replacing the results of the measurement in the Table 2 in the right side of Equations 12 and 13 will lead to:

$1.015 = \frac{0.0339 + \frac{0.4677 \times 0.5}{[\lambda_0 - se^{-962.68h} - 0.00012 \times 8.94]}}{0.0339 + \frac{0.4677 \times 0.5}{[\lambda_0 - se^{-19626h} - 0.00012 \times 8.65]}}$	
$1.01404 = \frac{0.0339 + \frac{0.4677 \times 0.5}{[\lambda_0 - se^{-19626h} - 0.00012 \times 8.94]}}{0.0339 + \frac{0.4677 \times 0.5}{[\lambda_0 - se^{-45524h} - 0.00012 \times 8.5]}}$	

Here, we have two equations with three unknowns λ_0 , s and h. So, by fixing the value of the parameter s, the set of two equations and two unknowns can be solved. Our limitation is to find a reasonable value for the λ_0 . Previous researches suggest that the value of λ^{50} for a new pipe manufactured in a factory with the same size is around 0.025 W/m/k but the pipes which are used in the laboratory are hand made and their ends got cut, we expect a higher value of the overall thermal conductivity of the single pipe around 0.027 W/m/k. Trial and error efforts show that a very small changes in the s parameter makes a great change in the value of λ_0 but small changes in h. Table 6 shows the range of the changes of the parameters λ_0 and h when s is prescribed.

Table 6: Values in parameters λ_0 and h when s is given

No	s, [W/m/k]	λ_0 , [W/m/k]	h, [$\frac{1}{hs}$]
1	0.00130	0.0253	0.00001490
2	0.00135	0.0262	0.00001499
3	0.00140	0.0272	0.00001508
4	0.00145	0.0282	0.00001516
5	0.00150	0.0291	0.00001523

It is interesting that the order of s is consistently 10 times higher than the order of the coefficient of the temperature dependency in equation 1, which is 0.0012. The degradation diagram of the thermal conductivity of PUR at 50 °C with different prescribed values for s and the derived values for the other parameters in Table 6, using the Equation 11 is presented at Figure 8. According to the diagram the $s = 0.00145$ is the best choice. The lower prescribed s values lead to a lower or close values to 0.025 W/m/k at $t = 0$ and the λ^{50} for the $s = 0.00150$ at $t = 0$ is much higher than the expected value.

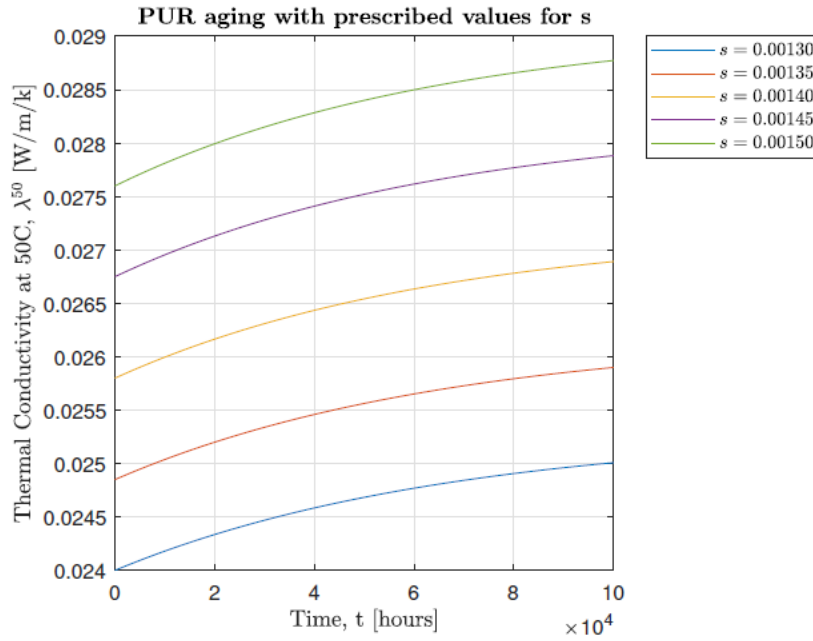


Figure 8: *Thermal conductivity of PUR at 50 °C with the prescribed values for s in Table 6*

It is important to be noticed that the derived values for the degradation of PUR is valid for the mean temperature of 41.5 °C between two boundaries of PUR or the values around that. One can expect a higher degradation rate for the PUR at higher mean temperatures like 70 or 80 °C. The mean temperature of the PUR during the six years of experiment is shown in Figure 9.

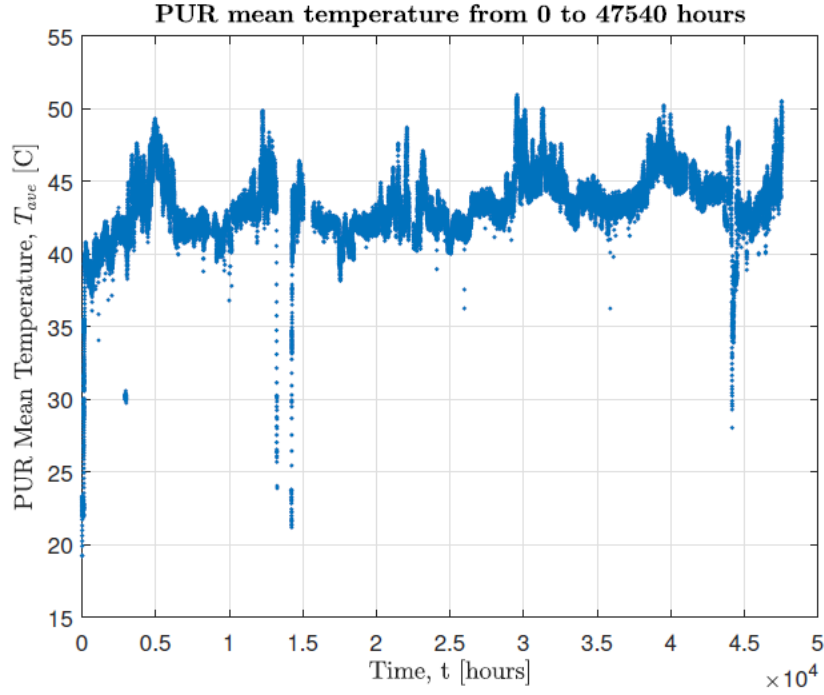


Figure 9: Mean temperature of PUR from the beginning to 47540 hours

Referring Figure 9, the mean temperature of the PUR varies between 40 °C to 50 °C if we neglect the outliers. In this interval one can assume that the values were derived for degradation of the PUR is valid. Hence, the Equation 11 can be rewritten as:

$\bar{\lambda}_{PUR} = (0.0282 - 0.00145e^{-0.00001516t}) + 0.00012(T_{ave} - 50)$	(14)
--	------

Where t represents time in hours.

According to Figure 1, one can calculate the λ_{VIP} by solving the steady state heat balance between the nodes T_s and T_{Mantel} , using Equation 15 for λ_{PUR} .

$K_{VIP}(T_s - T_{VIP}) = K_{PM}^{eq}(T_{VIP} - T_{Mantel})$	(15)
$\rightarrow \frac{2\pi\lambda_{VIP}}{\ln\left(\frac{r_{VIP}}{r_s - t_m}\right)} = K_{PM}^{eq} \frac{T_{VIP} - T_{Mantel}}{T_s - T_{VIP}}$	
$\rightarrow \lambda_{VIP} = \frac{\ln\left(\frac{r_{VIP}}{r_s - t_m}\right)}{2\pi} K_{PM}^{eq} \frac{T_{VIP} - T_{Mantel}}{T_s - T_{VIP}}$	

Figure 10 shows the calculated λ_{VIP} according to above equation. As it is shown, the Figure 10 is not sufficiently informative to make a conclusion about the effect of aging on λ_{VIP} . The values are needed to be decoupled from the temperatures of the boundaries of VIP and be evaluated at the time steps which are independent of solar radiation. It is more significant, when the mean temperature of VIP is very high

(more than 90 °C).

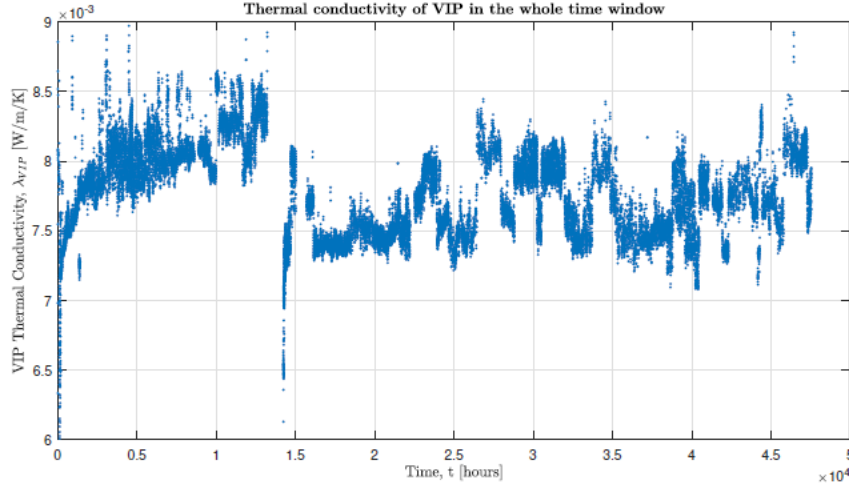


Figure 10: *Thermal conductivity of the VIP from the beginning to 47540 hours*

In this figure the influence of the aging of PUR is considered. As it is shown, the thermal conductivity of VIP goes up and down between 0.0074 W/m/k and 0.086 W/m/k which is not physically possible that the VIP become better or worse. The changes attribute from the changes of the boundary conditions. In order to evaluate the variation of λ_{VIP} over time, we look for moments with long time difference where there is equal heat flow over cross section of the VIP with equal T_s . So, for two time instants one and two:

$T_{s1} = T_{s2}$	
$K_{VIP1}(T_s - T_{VIP1}) = K_{VIP2}(T_s - T_{VIP2}) \rightarrow \frac{\lambda_{VIP2}}{\lambda_{VIP1}} = \frac{(T_s - T_{VIP1})}{(T_s - T_{VIP2})}$	

As a result, the heat flows in the VIP for the two moments are equal. As the steel pipe temperature is equal we expect a higher λ_{VIP} and higher T_{VIP} for the second moment. The script to apply the above formula gives the results which are presented in Table 7. It should be noted that the daylight solar radiation effect was filtered in the script, so we do not report the weather and day/night light in the table. The data of the table is given when solar radiation has no influence to the thermal network model.

Table 7: *The selected data set with the same steel pipe temperatures and equal heat flow in the VIP*

No	Date and time	T_s , °C	T_{VIP} , °C	T_{air} , °C	T_m , °C	Calculated λ_{VIP} , [W/m/K]
1	16-Feb-2014 05:32:27	115.3	61.10	20.10	23.00	0.0078-(0.0078914)
2	29-Nov-2016 04:43:44	115.3	62.70	21.20	25.50	0.0081-(0.0081315)
3	02-Dec-2016 20:43:44	115.3	62.70	20.80	25.50	0.0081-(0.0081318)

Points 2 and 3 are almost lie together. In the next step, the existence of steady state condition at intervals which contain the time instants of Table 7 has been checked. The sensitivity analysis method is similar to what has been done to the selected time instants of Table 2. The results of the analysis is presented in Figures

11, 12, 13 and Tables 8, 9, 10.

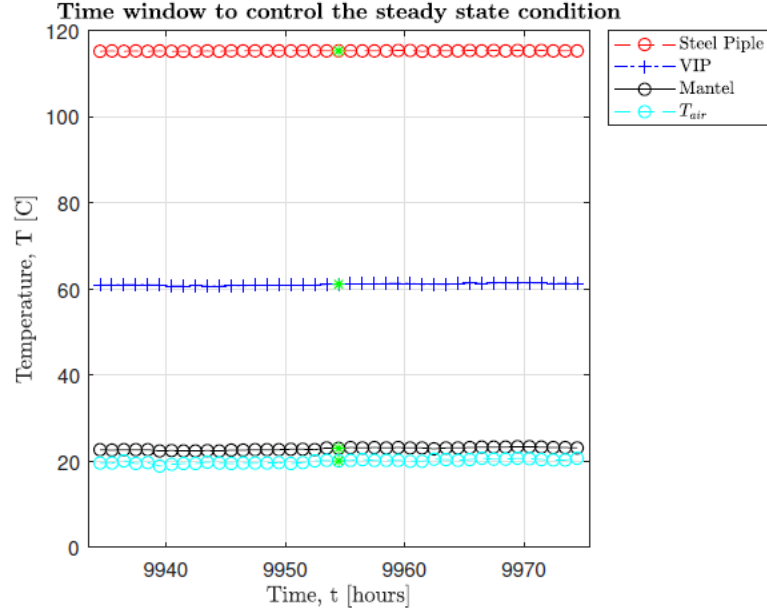


Figure 11: *Temperatures in an interval including 16-Feb-2014 05:32:27.*

Table 8: *Temperature variations in a time window including 16-Feb-2014 05:32:27.*

	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_{VIP}, ^\circ\text{C}$	$T_m, ^\circ\text{C}$	$T_{air}, ^\circ\text{C}$
Min	115.40	61.40	23.40	20.70
Max	115.20	60.70	22.40	18.90
Difference	0.20	0.70	1.00	1.80

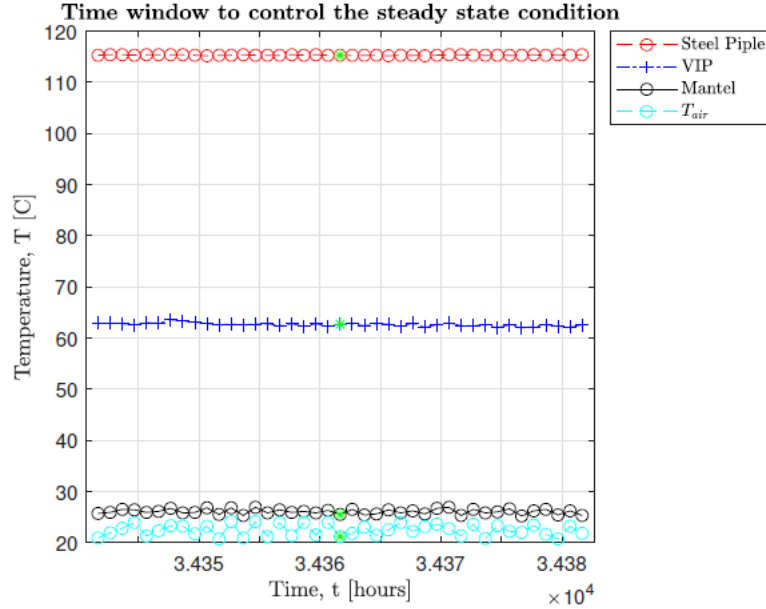


Figure 12: *Temperatures in an interval including 29-Nov-2016 04:43:44.*

Table 9: *Temperature variations in a time window including 29-Nov-2016 04:43:44.*

	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_{VIP}, ^\circ\text{C}$	$T_m, ^\circ\text{C}$	$T_{air}, ^\circ\text{C}$
Min	115.40	63.60	26.90	24.10
Max	115.20	62.00	25.20	20.70
Difference	0.20	1.60	1.70	4.60

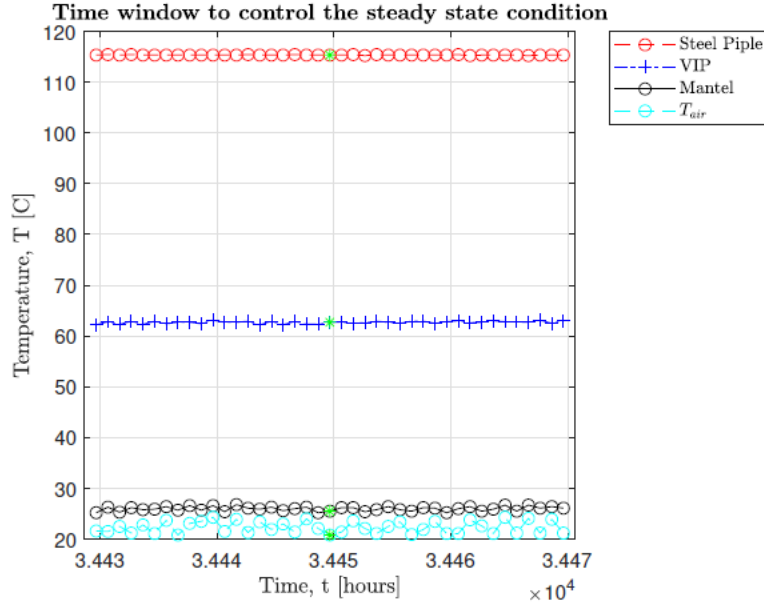


Figure 13: *Temperatures in an interval including 02-Dec-2016 20:43:44.*

Table 10: *Temperature variations in a time window including 02-Dec-2016 20:43:44.*

	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_{VIP}, ^\circ\text{C}$	$T_m, ^\circ\text{C}$	$T_{air}, ^\circ\text{C}$
Min	115.40	63.10	26.80	24.30
Max	115.20	62.20	25.20	20.80
Difference	0.20	0.90	1.60	3.50

Results of the Tables 8, 9, 10 show that the maximum variation is 19.08% change in T_{air} on 29-Nov-2016, which is not happened at two consecutive time steps, so it is not accounted as unsteady change. Columns 4 and 7 of the Table 7 and Figures 14 and 15 confirms our prediction about VIP temperature and VIP thermal conductivity over a long period of time.

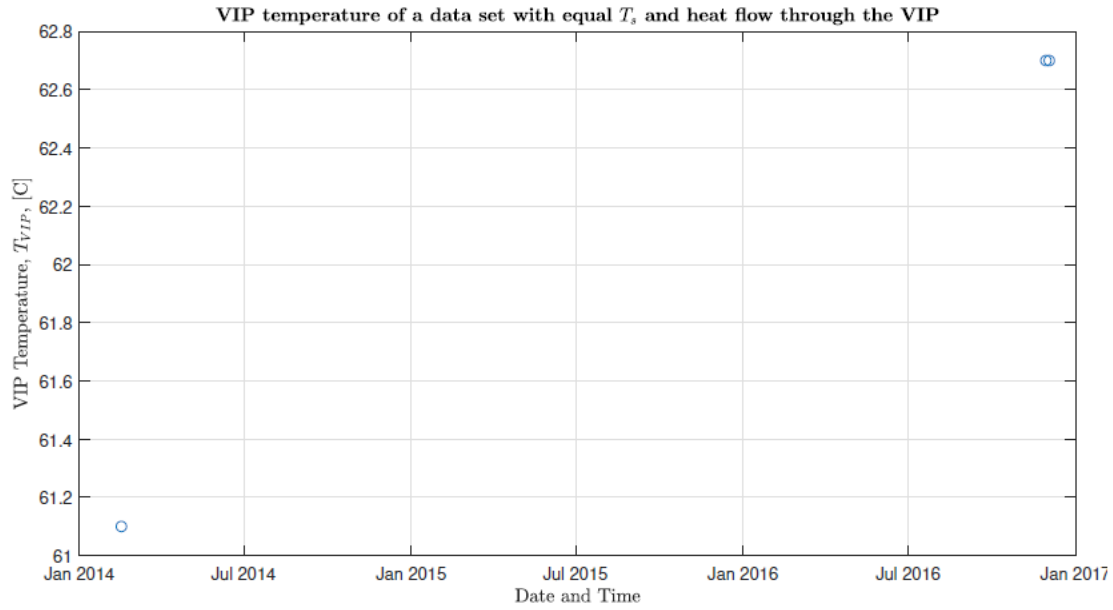


Figure 14: *Temperatures of the VIP at the selected data set is increased over 24495 hours*

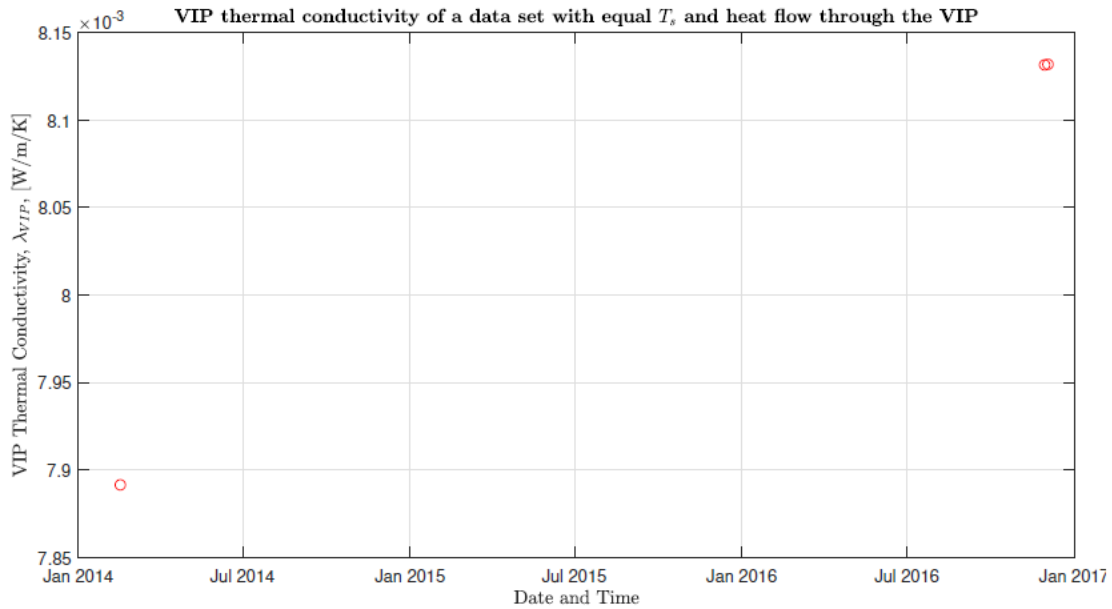


Figure 15: *Thermal conductivity of the VIP at the selected data set is increased over 24495 hours*

It is possible to adopt distinct ways to analyze the rate of the deterioration of the VIP. One can use the linear method where the thermal conductivity of the VIP has been increased about 3.046 % (Equation 15) after 24495 hours or 2.7962 years. Linear estimation suggests that the life time of the VIP which is wrapped around the medium pipe in the hybrid single district heating pipe which operates at the mean temperature of 113-114 °C is 91.8 years.

$\frac{\lambda_{VIP}(34449.6) - \lambda_{VIP}(9954.4)}{\lambda_{VIP}(9954.4)} = \frac{0.0081318 - 0.0078914}{0.0078914} = 0.03046$	
--	--

4. Bibliography

- [1] Bijan Adl-zarrabi. *Super insulation material in district heating pipes*. To be published in Journal of Building Physics.

LIVSLÄNGD FÖR HYBRIDISOLERADE FJÄRRVÄRMERÖR

Cirka 10 procent av den värmeenergi som skickas ut i fjärrvärmenätet försvinner på grund av värmeförluster från fjärrvärmerören. Förlusten kan vara mycket stor för de delar av nätet där värmetätheten är låg.

Genom högpresterande isolering runt framledningsröret, så kallad hybridisolering, kan värmeförlusterna reduceras med mellan 35 och 50 procent. Isoleringen gör det också möjligt att minska rördiametern utan att öka förlusterna.

Tidigare forskning visar att hybridisolering minskar värmeförlusterna med nästan 50 procent för ett singelrör och med runt 30 procent för ett dubbelrör. Nu konstaterar forskarna att försämringen av isoleringen bara är runt 1–1,5 procent om året. Det betyder att om det fortsätter i samma hastighet har hybridisolerade fjärrvärmerör med vakuumpaneler en livslängd på mellan 50 och 100 år. Mätningarna har pågått i drygt 7 år och det går därför inte med säkerhet att säga att försämringen av isoleringen sker linjärt under hela livslängden.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin.



Energiforsk