

10e Congrès International sur le Chauffage et le Froid Urbain

Du 3 au 5 septembre 2006

Mardi 5 septembre 2006

Section 6 a

Distribution de la chaleur – propriétés des tuyaux

**Capacité d'isolation
des tuyaux de chauffage souples**

C. Persson, U. Jarfelt, O. Ramnäs, C. Reidhav,
Université de Technologie de Chalmers,
Göteborg/Suède

Capacité d'isolation des tuyaux de chauffage souples

Camilla Persson¹ camilla.persson@chalmers.se

Charlotte Reidhav¹ charlotte.reidhav@chalmers.se

Ulf Jarfelt¹ ulf.jarfelt@chalmers.se

Olle Ramnäs² oramn@chalmers.se

¹Département de la Technologie de Construction

²Département de Science de l'Environnement

Université de Technologie de Chalmers

SE- 412 96 Göteborg, Suède

RESUME

Les tuyaux de chauffage urbain souples sont construits à partir de tuyaux caloporteurs en cuivre, de mousse de polyuréthane semi-rigide et d'une enveloppe en polyéthylène de faible densité (LDPE). Ils sont utilisés de façon très répandue aujourd'hui. La qualité de souplesse des tuyaux de chauffage urbain leur permet d'être produits et utilisés sur des longueurs plus importantes - ce qui nécessite une quantité moindre de raccordements entre les tuyaux - et d'éviter les obstacles sur le terrain. Le travail de pose étant facilité, les tuyaux souples sont souvent utilisés pour relier des maisons aux réseaux de chauffage urbain. Les pertes de chaleur distribuée sont considérables dans ce type de zone et il n'y a actuellement aucune norme qui régule les propriétés thermiques des tuyaux souples.

La capacité d'isolation de la mousse de polyuréthane diminue avec le temps en raison de la diffusion de gaz (air et agents d'expansion) à l'intérieur et à l'extérieur de la mousse. L'évolution du contenu des gaz de moussage a été mesurée. De fait, la baisse de l'efficacité de l'isolation peut être calculée.

Les résultats montrent que le rendement d'isolation des tuyaux souples diffère de celle des tuyaux rigides. Elle décroît plus rapidement pour les tuyaux souples, principalement à cause du transport de gaz dans les poches d'air formées entre la mousse et le tuyau caloporteur en cuivre. Les gaz de moussage ont une meilleure capacité de diffusion avec la mousse de polyuréthane semi-rigide en comparaison avec la mousse de polyuréthane rigide, ce qui contribue également à accélérer le processus de vieillissement.

1. INTRODUCTION

La flexibilité des tuyaux de chauffage urbain souples leur permet d'être produits et utilisés sur des longueurs plus importantes – ce qui nécessite une moindre quantité de raccords – et d'éviter les obstacles sur le terrain. Aujourd'hui, les tuyaux souples sont souvent utilisés pour relier des maisons aux réseaux de chauffage urbain. En effet, ils sont plus faciles à poser que les tuyaux rigides.

La construction de tuyaux souples fait appel à des matériaux plus souples que les tuyaux rigides traditionnels. La plus fréquemment utilisée (note du traducteur : en Suède) fait appel à un tuyau caloporteur en cuivre, de la mousse de polyuréthane semi-rigide pour l'isolation et à une enveloppe en polyéthylène de faible densité (LPDE). La réglementation européenne vis à vis des spécifications techniques des tuyaux souples, en équivalence de celle des tuyaux rigides, EN 253, est en cours d'élaboration. Ainsi, il n'y a pour le moment aucune norme régulant les propriétés thermiques des tuyaux souples.

Les propriétés thermiques à long terme des tuyaux de chauffage urbain souples ont été approfondies dans une étude de Reidhav [1]. Les résultats ont montré que l'efficacité d'isolation des tuyaux souples diffère de celle des tuyaux rigides. La capacité d'isolation de la mousse de polyuréthane diminue avec le temps en raison de la diffusion de gaz de moussage (dioxyde de carbone et cyclopentane) à l'extérieur de la mousse, et d'air (oxygène et azote) à l'intérieur de la mousse. Ce processus de vieillissement de la mousse est plus rapide pour les tuyaux souples que pour les tuyaux rigides. Le rapport de Reidhav [1] est le point de départ de la présente étude qui approfondit les propriétés des tuyaux souples.

2. PROCEDE EXPERIMENTAL

2.1 Diffusion de gaz de moussage dans la mousse de polyuréthane semi-rigide.

La diffusion de gaz dans la mousse de polyuréthane semi-rigide est étudiée selon une méthode décrite plus haut [2]. Des cylindres de mousse sont découpés à l'intérieur du tuyau décrit dans le paragraphe 2.2. Des plaques d'aluminium sont collées aux extrémités de chaque cylindre afin d'éviter une diffusion longitudinale. On place les cylindres à température ambiante. La composition en gaz de moussage des cylindres est analysée [3] à différents intervalles qui déterminent les coefficients de diffusion effective [2]. Le calcul des coefficients est présenté dans le tableau 1.

2.2 Diffusion de gaz de moussage dans l'ensemble du tuyau souple.

La diffusion de gaz dans un échantillon de tuyau souple est étudiée en mesurant la composition en gaz de moussage de la mousse de polyuréthane semi-rigide à différents niveaux (0.1, 0.5, 1.0, 2.25 et 3.5 m) depuis l'extrémité du tuyau, et à des moments de temps différents. L'échantillon considéré est un tuyau caloporteur en cuivre d'un diamètre de 22mm et d'une enveloppe de protection mécanique LDPE d'un diamètre de 90mm. Le tuyau est isolé avec une mousse de polyuréthane semi-rigide et possède une barrière de diffusion en feuille d'aluminium sur les parois extérieures. Le tuyau est fabriqué et livré en couronnes. Il est coupé en tronçons de 7m au début du mois de mars (= semaine 0, environ 6 semaines après la fabrication). Les tronçons proches des extrémités du tuyau ne sont pas conservés. Les tronçons restants sont positionnés de sorte à reproduire les conditions sur le terrain. Le contenu initial en gaz de moussage de la mousse en polyuréthane souple est analysé sur un des tronçons du tuyau afin d'établir le contenu initial en gaz de moussage (semaine 0). Pendant ce temps, les autres tronçons sont placés à température ambiante et analysés au bout de 6, 13, 28 et 44 semaines de stockage.

Le contenu en gaz de moussage est déterminé en fonction de [2]. Dans cette technique, les cylindres de mousse sont placés dans un appareil spécial et les gaz de moussage produits sont analysés par chromatographie. Cette technique donne la pression totale de gaz de moussage ainsi que la part de chaque gaz comme le cyclopentane, le dioxyde de carbone, l'oxygène et l'azote. Les résultats de ces analyses sont présentés dans le schéma 1.

2.3 Poches d'air le long du tuyau

Afin de déterminer s'il existe des poches d'air entre le tuyau caloporteur en cuivre et la mousse ou entre l'enveloppe de protection et la mousse, de petits morceaux du tuyau (0,3m) sont immergés dans de l'eau colorée. De cette façon, l'eau pénètre dans les poches d'air et les colore. Le dispositif expérimental et une photo d'une section de mousse sont présentés dans le schéma 2.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Emission de gaz de moussage dans la mousse de polyuréthane semi-rigide.

Les coefficients de diffusion effective de gaz de moussage dans la mousse de polyuréthane semi-rigide à température ambiante sont présentés dans le tableau 1 et comparés avec les coefficients de diffusion de mousse rigide empruntés à un ouvrage.

Tableau 1. Coefficients de diffusion effective de gaz dans la mousse de polyuréthane semi-rigides et rigide à température ambiante (23°C).

Gaz de moussage	dans	
	$[10^{-13} m^2/s]$	
	Tuyau souple	Tuyau rigide [4]
Cyclopentane	30	0,6
Dioxyde de carbone	2000	500
Azote	80	25
Oxygène	600	150

Les coefficients de diffusion effective de dioxyde de carbone, d'azote et d'oxygène sont environ 3 à 4 fois plus élevés pour la mousse de polyuréthane semi-rigides que pour la mousse de polyuréthane rigide. La différence entre les deux types de mousse au niveau des coefficients de cyclopentane est encore plus importante. Ainsi, le transport de gaz est plus rapide pour la mousse de polyuréthane semi-rigide en comparaison à la mousse rigide.

En considérant la diffusion longitudinale dans la mousse et les coefficients de diffusion présentés dans le tableau 1, les calculs ne relèvent aucune influence de l'extrémité ouverte du tuyau à une distance < 6cm à partir de l'ouverture du tuyau pour la mousse semi-rigide et < 4cm pour la mousse rigide après 44 semaines de stockage. Ainsi, l'augmentation mesurée de la pression partielle d'azote dans la mousse semi-rigide d'un tuyau, d'environ 3kPa à 22kPa sur toute la longueur du tuyau au bout de 44 semaines (voir schéma 1) ne peut pas être expliquée par la diffusion longitudinale.

3.2 Emission de gaz de moussage dans l'ensemble du tuyau souple.

L'évolution des pressions partielles des gaz de moussage avec le temps et à différents endroits est détaillée dans le schéma 1. Le schéma montre également les pressions partielles dans les cellules de la mousse à différents endroits à partir de l'extrémité du tuyau.

Les pressions partielles d'oxygène et d'azote sont presque constantes sur toute la longueur du tuyau. Il y a, cependant, une augmentation plus importante de la dose des pressions partielles, détectable jusqu'à environ 0,5m à partir de l'extrémité du tuyau. Les pressions partielles ont augmenté de façon continue et ce jusqu'à un équilibre avec l'air.

La pression partielle de cyclopentane mesurée durant l'étude reste presque constante à environ 20kPa.

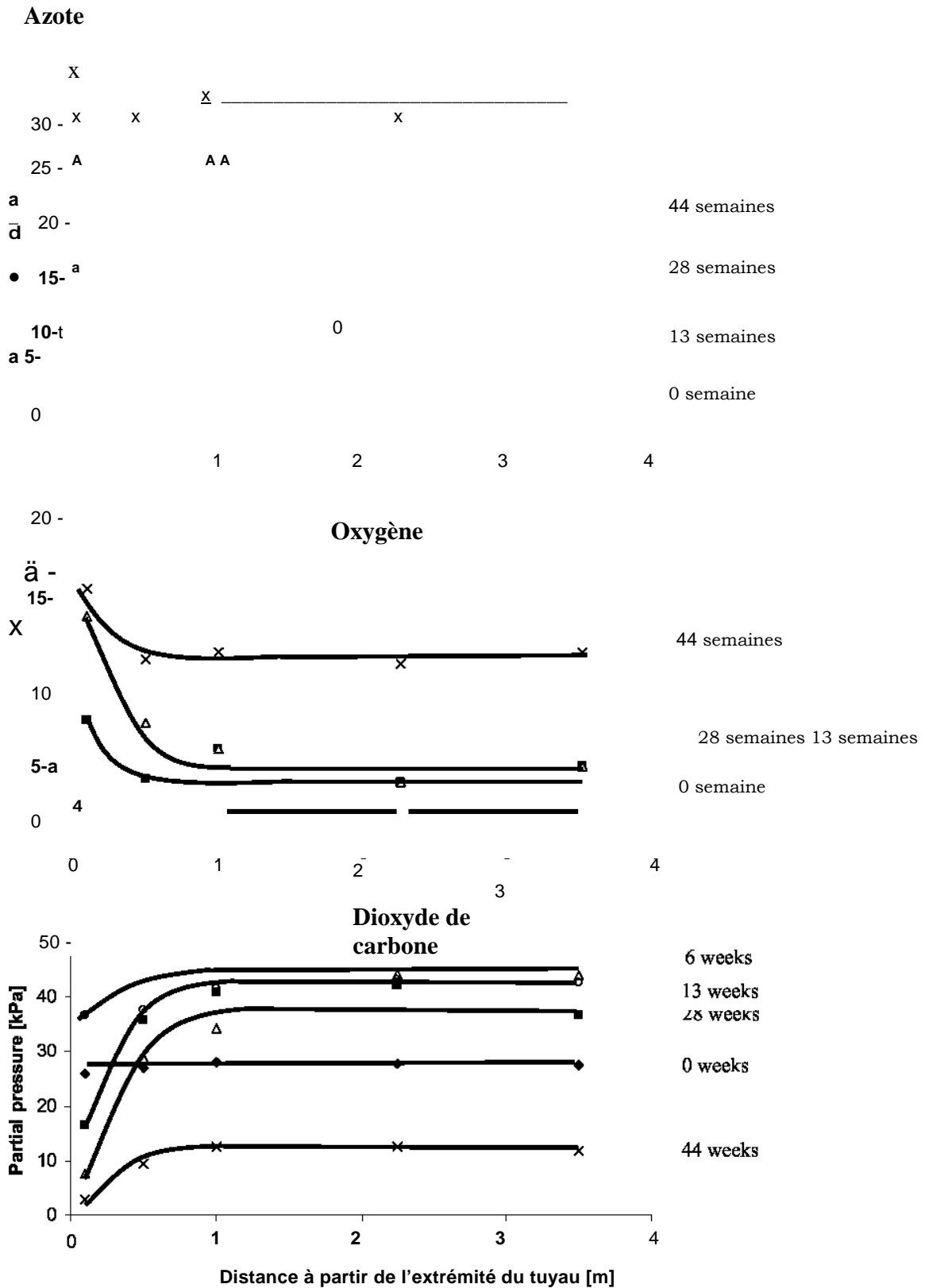


Schéma 1. Evolution de la pression partielle d'azote, oxygène, et dioxyde de carbone dans une mousse de polyuréthane semi-rigide avec le temps et à différents endroits à partir de l'extrémité de l'ensemble du tuyau (tuyau de cuivre de 22 mm, enveloppe de protection de 90 mm) à température ambiante.

Le comportement du dioxyde de carbone montré dans le schéma 1, diffère de celui de l'oxygène ou de l'azote. Durant les premières semaines, la pression partielle augmente d'environ 28kPa à 44kPa et reste à ce niveau jusqu'à une baisse observée au bout de 13 semaines de stockage. L'augmentation de la quantité de dioxyde de carbone est entraînée par la réaction entre l'eau et l'isocyanate, incomplète sur une durée normale. Ce type de comportement peut parfois être observé sur les tuyaux de chauffage urbain qui sortent de l'usine, d'après nos observations. L'augmentation initiale de la quantité de dioxyde de carbone est ainsi la conséquence d'une réaction chimique qui produit du dioxyde de carbone dans la mousse. Au-delà de cet aspect, le comportement est similaire à celui d'autres gaz avec une augmentation ou baisse quasi constante sur toute la longueur du tuyau et une augmentation ou baisse plus importante à l'extrémité du tuyau.

L'augmentation ou baisse constante des quatre gaz de moussage sur toute la longueur du tuyau ne dépend pas de la diffusion radiale à travers la paroi. Le tuyau possède une barrière de diffusion perméable constituée de feuilles d'aluminium à l'intérieur des parois. L'efficacité de la barrière de diffusion a été prouvée par des tests à des températures élevées.

Ainsi, l'évolution rapide du contenu en gaz de moussage ne peut être attribuée ni à la diffusion radiale à travers la paroi, comme mentionné plus haut, ni à la diffusion longitudinale.

3.3 Poches d'air sur la longueur du tuyau.

L'étude expérimentale où l'on immergeait un échantillon de tuyau dans de l'eau colorée prouve la présence de poches d'air entre le tuyau caloporteur et la mousse, comme le montre le schéma 2. L'eau colorée pénètre à l'intérieur des poches d'air entre la mousse et le tuyau caloporteur au niveau de l'eau (environ 25cm) en moins d'un jour. Aucune pénétration de l'eau colorée entre la mousse et la paroi n'a été observée.

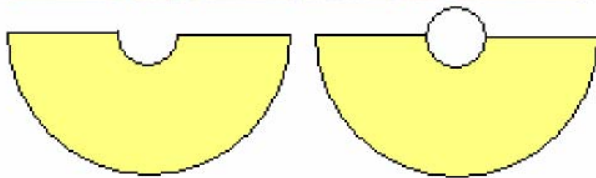
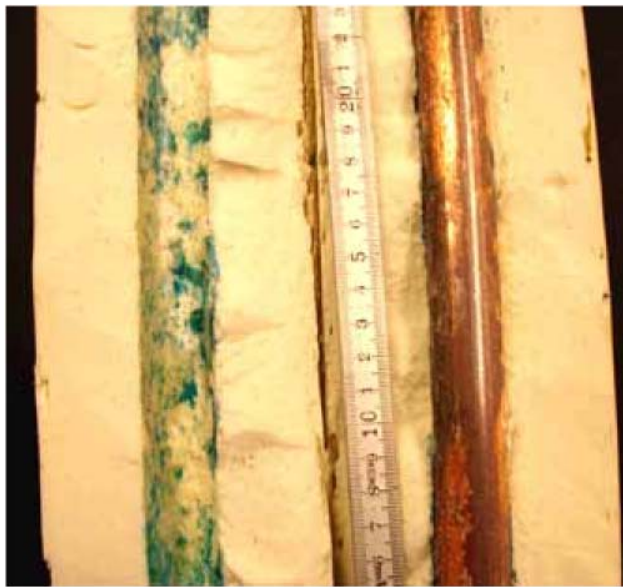
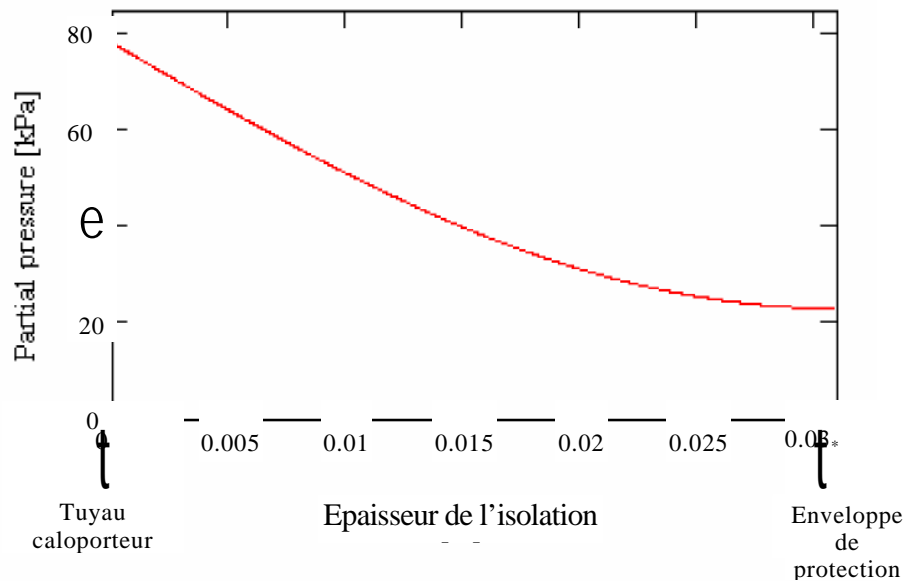


Schéma 2. Mousse de polyuréthane semi-rigide retirée de la paroi et coupée en deux moitiés, présentée sur la longueur du tuyau (ci-dessus) et à partir de l'extrémité (ci-dessous). La présence de poches d'air entre le tuyau caloporteur et l'isolant est illustrée par les zones colorées (zones sombres) sur le tuyau de gauche. Remarque : la surface luisante du tuyau de cuivre montre que l'adhésion de la mousse présentait des imperfections.

Le dispositif expérimental avec le tuyau immergé est présenté à droite.

L'effet maximal de la diffusion radiale de gaz de moussage à travers les poches d'airs entre le tuyau caloporteur et la mousse a été estimé. Toute la surface de la mousse autour du tuyau caloporteur était



ouverte à la diffusion vers l'air. Des équations ont été utilisées afin de déterminer le point de changement dans la concentration [5].

Schéma 3. Pression partielle d'azote dans un tronçon de mousse de polyuréthane semi-rigide après un stockage à température ambiante de 44 semaines. La surface de la mousse autour du tuyau de cuivre est totalement ouverte à la diffusion d'air. La pression partielle initiale d'azote est estimée à 3kPa.

S'il n'y avait pas eu d'adhésion entre le tuyau caloporteur et la mousse, la pression partielle moyenne d'azote aurait été de 40 kPa au bout de 44 semaines de stockage comme le montre le schéma 3. La pression partielle d'azote mesurée était d'environ 20 kPa, comme le montre le schéma 1. En comparant ces deux cas de figure, on remarque que l'adhésion entre le tuyau de branchement et la mousse de polyuréthane présentait des imperfections mais que la jonction n'était pas totalement ouverte à la diffusion. On peut donc conclure qu'il y a des poches d'air entre la

mousse et le tuyau caloporteur composant un tuyau souple. La diffusion rapide de gaz et, de fait, la vitesse de vieillissement du tuyau souple est donc principalement due à la présence de ces poches d'air.

4. CONCLUSION

La baisse du rendement d'isolation de la mousse de polyuréthane semi-rigide contenue dans les tuyaux de chauffage urbain souples est plus importante que celle observée pour la mousse de polyuréthane rigide utilisée pour les tuyaux de chauffage urbain rigides. Au bout de 44 semaines de stockage à température ambiante, l'efficacité d'isolation des tuyaux souples est réduite de 25%, c'est à dire la moitié de la baisse totale de la capacité d'isolation sur la durée de vie du tuyau. Ce processus rapide de vieillissement est principalement dû aux poches d'air qui favorisent les échanges entre la mousse et le tuyau caloporteur. La baisse rapide de la capacité d'isolation est également l'effet de la diffusion plus importante dans la mousse de polyuréthane semi-rigide que dans la mousse de polyuréthane rigide traditionnelle.

5. REFERENCES

1. C.REIDHAV, *Flexible district heating pipes in areas with detached houses*, Lic Thesis, Lic 2005:6, Chalmers University of Technology, Göteborg 2005.
2. M.SVANSTRÖM, O.RAMNÄS, M.OLSSON AND U.JARFELT, *Determination of Effective Diffusion Coefficients in Rigid Polyurethane foam*, Journal of Cellular Polymers 16, pp 182-193, 1995.
3. M.SVANSTRÖM AND O.RAMNÄS, *A Method for Analysing the Gas Phase in Polyurethane Foam*, Journal of Cellular Plastics 31, pp 375-388, 1995.
4. M.E.OLSSON, U.JARFELT, M.FRÖLING, S.MANGS AND O.RAMNÄS, *Diffusion of cyclopentane in polyurethane foam at different temperatures and implications for district heating pipes*, Journal of Cellular Plastics 38, pp 177-188, 2002.
5. C-E.HAGENTOFT, *Introduction to Building Physics*, Studentlitteratur, Lund 2001.

10th International Symposium on District Heating and Cooling

September 3-5, 2006

Tuesday, 5 September 2006

Sektion 6 a

Heat distribution - pipe properties

**Insulating performance of flexible
district heating pipes**

C. Persson, U. Jarfelt, O. Ramnäs, C. Reidhav,
Chalmers University of Technology, Göteborg/Sweden

Insulating performance of flexible district heating pipes

Camilla Persson¹ camilla.persson@chalmers.se

Charlotte Reidhav¹ charlotte.reidhav@chalmers.se

Ulf Jarfelt¹ ulf.jarfelt@chalmers.se

Olle Ramnäs²
oramn@chalmers.se

¹Department of Building Technology

²Department of Chemical Environmental Science

Chalmers University of Technology

SE- 412 96 Göteborg, Sweden

ABSTRACT

Flexible district heating pipes made of a copper service pipe, semi-flexible polyurethane foam and a low density polyethylene (LDPE) casing are widely used today. The bendable quality of flexible district heating pipes allows them to be produced and used in long lengths - thereby resulting in fewer pipe joints - and to overcome obstacles in the ground. As a result of the facilitated ground work, flexible pipes are often used when connecting detached houses to district heating systems. The distribution heat losses are considerable in these areas and there is at present no standard regulating the thermal properties of flexible pipes.

The insulation capacity of polyurethane foam decreases over time due to diffusion of gases (air and blowing agents) into and out of the foam. The change in cell gas content over time was measured and thereby the decrease of insulation capacity could be calculated.

The results show that the insulating performance of flexible pipes differs from that of straight pipes. The insulation capacity decreases more rapidly for flexible pipes, mainly due to gas transport in air gaps between the foam and the copper service pipe. The cell gases have a higher diffusivity in semi-flexible polyurethane foam compared to rigid polyurethane foam which also contributes to the faster ageing process.

1. INTRODUCTION

The bendable quality of flexible district heating pipes allows them to be produced and used in long lengths - thereby resulting in fewer joints - and to overcome obstacles in the ground. Today,

flexible pipes are widely used when connecting areas with detached houses to district heating systems due to the facilitated pipe laying compared to straight pipes.

The flexible pipe construction is composed of more flexible materials compared to traditional straight pipes. A frequently used flexible pipe construction has a copper service pipe, insulation of semi-flexible polyurethane foam and a low density polyethene (LDPE) casing. European regulations regarding flexible pipes' technical functions, corresponding to those of straight pipes, EN 253, are being developed. Thus, there is at present no standard regulating the thermal properties of flexible pipes.

The long term thermal properties of flexible district heating pipes were investigated in an introductory study by Reidhav [1]. The results showed that the insulating performance of flexible pipes differ from that of straight pipes. The insulation capacity of the polyurethane foam decreases over time due to diffusion of cell gases (carbon dioxide and cyclopentane) out of the foam and of air (oxygen and nitrogen) into the foam. This ageing process of the foam is faster for flexible pipes compared to that for straight pipes. The report by Reidhav [1] was the startingpoint of the present study where the thermal properties for flexible pipes have been further investigated.

2. EXPERIMENTAL

2.1 Diffusion of cell gases in the semi-flexible polyurethane foam

The diffusion of gases in the semi-flexible polyurethane foam was studied according to a method earlier described [2]. Cylinders of foam were cut out from the pipe described in paragraph 2.2. Aluminium plates were glued onto the ends of the cylinders in order to prevent longitudinal diffusion. The cylinders were stored at room temperature. The cell gas compositions of the cylinders were analysed [3] at different time intervals and the effective diffusion coefficients were calculated according to [2]. The calculated coefficients are shown in Table 1.

2.2 Diffusion of cell gases in the flexible pipe assembly

The diffusion of gases in a flexible pipe construction was studied by measuring the cell gas composition of the semi-flexible polyurethane foam at different positions (0.1, 0.5, 1.0, 2.25 and 3.5 m) from the open pipe end and after different times. The pipe construction consisted of a copper service pipe with a diameter of 22 mm and an LDPE casing with a diameter of 90 mm. The pipe was insulated with semi-flexible polyurethane foam and it had a diffusion barrier made of aluminium foil inside the casing. The pipe was manufactured and delivered coiled on a roll. The pipe was cut in 7 m long pieces at the beginning of March (=week 0, about 6 weeks after manufacturing). The pieces closest to the pipe ends were disposed. The remaining pieces were straightened to imitate the conditions in field. The initial cell gas content of the flexible polyurethane foam was analysed for one pipe piece, thus establishing the initial cell gas content (week 0), while the remaining pieces were stored at room temperature and analysed after 6, 13, 28 and 44 weeks of storage.

The cell gas content was determined according to [2]. In this method, foam cylinders are ground in a special equipment and the released cell gases are analysed by gas chromatography. This method gives the total cell gas pressure and also the shares of each gas such as the share of cyclopentane, carbon dioxide, oxygen and nitrogen. The results of the analyses are shown in Figure 1.

2.3 Air-gaps along the pipe

To investigate if any air-gaps existed between the copper pipe and the foam or between the casing and the foam, short pieces of the pipe (0.3 m) were immersed into dyed water with the intention to penetrate and colour the air-gaps. The experimental set-up and a photo of a cross-section of the foam are shown in Figure 2.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Diffusion of cell gases in the semi-flexible polyurethane foam

The effective diffusion coefficients of cell gases in semi-flexible polyurethane foam at room temperature are shown in Table 1 and compared with diffusion coefficients for rigid foam given in literature.

Table 1. Effective diffusion coefficients of gases in semi-flexible and rigid polyurethane foam at room temperature (23°C).

Cell gas	in	
	$[10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}]$	
	Flexible pipe	Straight pipe [4]
Cyclopentane	30	0.6
Carbon dioxide	2000	500
Nitrogen	80	25
Oxygen	600	150

The effective diffusion coefficients of carbon dioxide, nitrogen and oxygen are about 3-4 times higher in semi-flexible polyurethane foam than in rigid polyurethane foam. The difference between the coefficients of cyclopentane in the two types of foam is even greater. Thus, the gas transport is faster in semi-flexible polyurethane foam compared to that in rigid foam.

Assuming only longitudinal diffusion in the foam and using the diffusion coefficients presented in Table 1, calculations show no influence of the open pipe end at distances <6 cm from the open pipe end for semi-flexible foam and <4 cm for rigid foam after 44 weeks of storage. Thus, the measured increase of the partial pressure of nitrogen in the semi-flexible foam of a pipe, from about 3 kPa to 22 kPa along the whole pipe length after 44 weeks (see Figure 1) can not be explained by longitudinal diffusion.

3.2 Diffusion of cell gases in the flexible pipe assembly

The change of the partial pressures of the cell gases over time at different positions is shown in Figure 1. The figure shows the partial pressures in the foam cells at different positions from the open pipe end.

The partial pressures of oxygen and nitrogen are almost constant over all the pipe length. There is however, an additional increase of the partial pressures close to the pipe end, detectable up to approximately 0.5 meters from the open pipe end. The partial pressures have increased continuously and are expected to increase until equilibrium with air.

The partial pressure of cyclopentane remained almost constant at about 20kPa during the study.

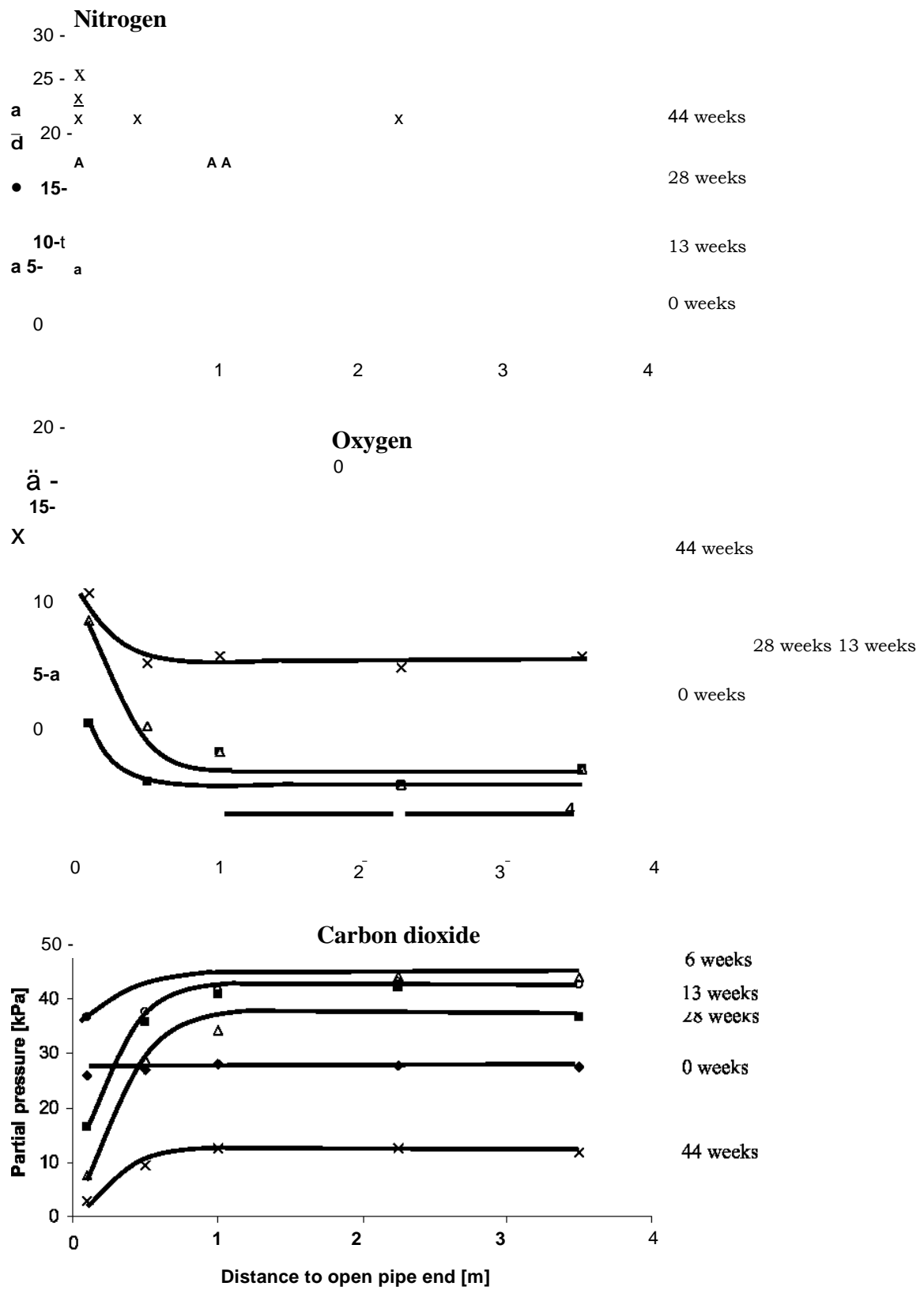


Figure 1. Change of partial pressure of nitrogen, oxygen and carbon dioxide in a semi-flexible

polyurethane foam over time at different positions from the open end of the pipe assembly (22 mm copper pipe, 90 mm casing) at room temperature.

The behaviour of carbon dioxide, shown in Figure 1, differs from that of oxygen and nitrogen. During the first six weeks the partial pressure increases from around 28 kPa to 44 kPa and remains at this level until a reduction can be observed after 13 weeks of storage. The increase of carbon dioxide depends on the reaction between water and isocyanate that was not complete after normal time. This behaviour is sometimes observed for newly manufactured district heating pipes according to our experience. The initial increase of carbon dioxide is thus an effect of a chemical reaction that produces carbon dioxide in the foam. Apart from this, the behaviour is similar to the other gases with an almost constant increase/decrease over the total pipe length and an additional increase/decrease at the pipe end.

The constant increase/decrease of all the four cell gases over the pipe length can not depend on radial diffusion through the casing. The pipe has a non permeable diffusion barrier made of aluminium foil inside the casing. The efficiency of this diffusion barrier has been confirmed in tests at elevated temperature.

Thus, the rapid change of cell gas content can not be ascribed to radial diffusion through the casing or, as earlier mentioned, it can not either be ascribed to longitudinal diffusion.

3.3 Air-gaps along the pipe length

The experimental study where a short pipe sample was immersed into dyed water demonstrated the presence of air gaps between the service pipe and the foam as shown in Figure 2. Dyed water had penetrated the air-gaps between the foam and the service pipe to the water level, about 25cm, during less than one day. No penetration of dyed water was observed between the foam and the casing.

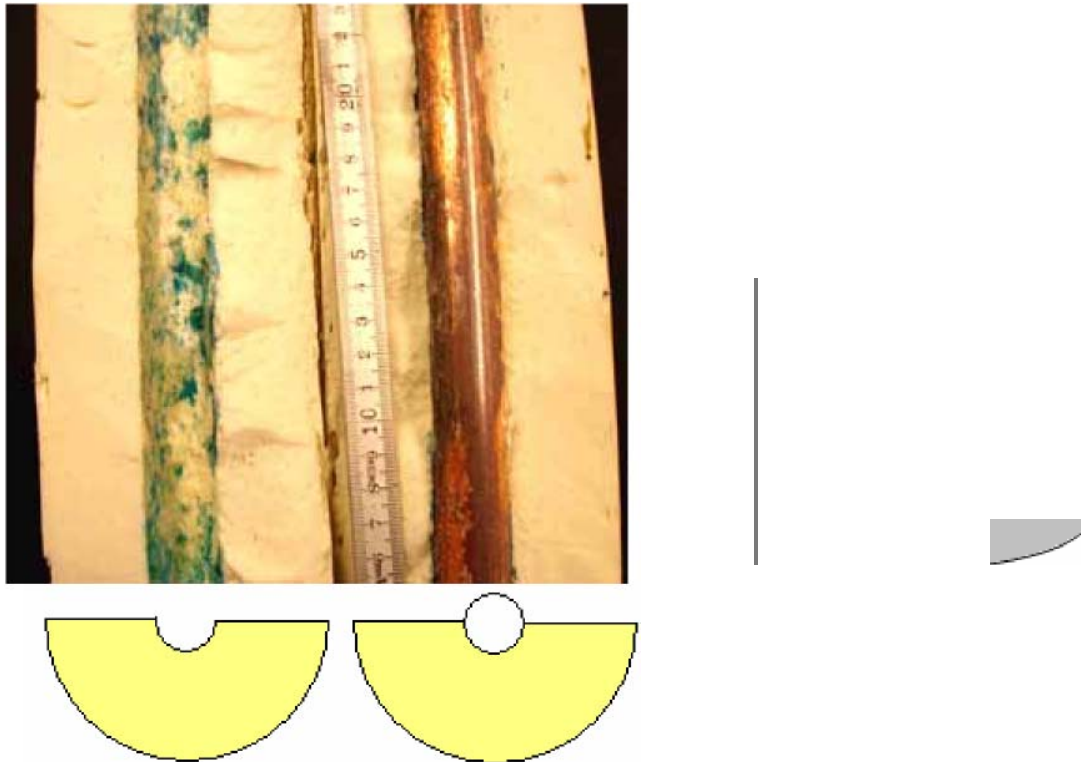


Figure 2. Semi-flexible polyurethane foam peeled off the casing and divided into two half pipes, shown along the pipe (above) and from the short end (below). The extension of the air-gaps between the service pipe and the insulation is illustrated by the dyed areas (dark coloured areas) an the left half pipe. Notice also the shiny surface of the copper pipe which indicates that the adhesion to the foam was imperfect.

The experimental set up with the immersed pipe is shown to the right.

The maximal effect of radial diffusion of cell gases through the air-gaps between the service pipe and the foam has been estimated. It was assumed that all the surface of the foam surrounding the service pipe was open to diffusion to air. Equations describing a step-change in concentration regarding a slab were used [5].

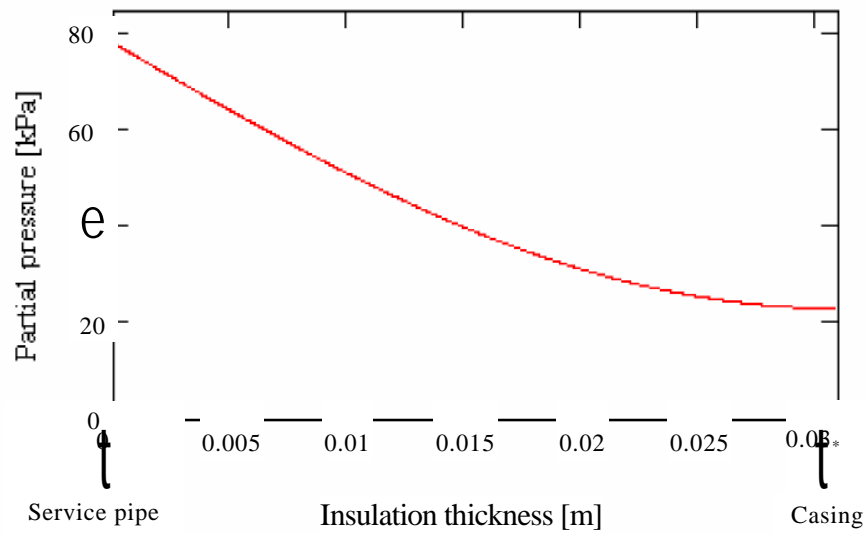


Figure 3. The partial pressure of nitrogen in a cross section of the semi-flexible polyurethane foam after storage at room temperature during 44 weeks. The foam surface surrounding the copper pipe is assumed to be completely open to diffusion of air. The initial partial pressure of nitrogen was assumed to be 3 kPa.

If there was no adhesion between the service pipe and the foam, the average partial pressure of nitrogen would be about 40 kPa after 44 weeks of storage as seen in figure 3. The measured partial pressure of the nitrogen was about 20 kPa, as showed in figure 1. A comparison of these cases indicates that the adhesion between the service pipe and the polyurethane foam was imperfect, but the connection was not totally open to diffusion. It can thus be concluded that there are air-gaps between the foam and the service pipe in the flexible pipe construction. The fast diffusion of gases and consequently ageing of the flexible pipe is primarily due to the presence of these air-gaps.

4. CONCLUSIONS

The reduction of the insulating performance of semi-flexible polyurethane foam in flexible district heating pipes progresses faster than observed for rigid polyurethane foam in straight district heating pipes. After 44 weeks of storage at room temperature the insulation capacity of the flexible pipes was reduced by 25% which represents half of the total reduction of insulation capacity during the life time. This fast ageing process is primarily due to air-gaps open to diffusion between the foam and the service pipe. The fast decrease of insulating capacity is also an effect of the higher diffusivity in semi-flexible polyurethane foam than in traditional rigid polyurethane foam.

5. REFERENCES

1. C.REIDHAV, *Flexible district heating pipes in areas with detached houses*, Lic Thesis, Lic 2005:6, Chalmers University of Technology, Göteborg 2005.
2. M.SVANSTRÖM, O.RAMNÄS, M.OLSSON AND U.JARFELT, *Determination of Effective Diffusion Coefficients in Rigid Polyurethane foam*, Journal of Cellular Polymers 16, pp 182-193, 1995.
3. M.SVANSTRÖM AND O.RAMNÄS, *A Method for Analysing the Gas Phase in Polyurethane Foam*, Journal of Cellular Plastics 31, pp 375-388, 1995.
4. M.E.OLSSON, U.JARFELT, M.FRÖLING, S.MANGS AND O.RAMNÄS, *Diffusion of cyclopentane in polyurethane foam at different temperatures and implications for district heating pipes*, Journal of Cellular Plastics 38, pp 177-188, 2002.
5. C-E.HAGENTOFT, *Introduction to Building Physics*, Studentlitteratur, Lund 2001.