

Analisa Kegagalan Pipa PVC Pada Sistem Pemanas Air Rumah Tangga

Hermawan Judawisastra, Permonowidi

Program Studi Teknik Material, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung
Ganesa 10 Bandung 40132
E-mail : hermawan.judawisastra@material.itb.ac.id

Abstrak

Pipa PVC (*Poly Vinyl Chloride*) yang digunakan pada saluran sistem pemanas air rumah tangga mengalami kebocoran setelah beroperasi selama dua tahun. Modus kegagalan yang teramat berupa retakan disertai penggelembungan dan pemudaran warna. Analisis kegagalan dilakukan untuk mencari penyebab kegagalan, sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan sehingga masalah serupa dapat dihindarkan. Pemeriksaan visual, makroskopik dan mikroskopik dilakukan untuk mengevaluasi bentuk dan modus kerusakan fisik yang terjadi. Sifat fisik dan mekanik dikarakterisasi dengan menggunakan uji tarik dan Differential Scanning Calorimetry (DSC). Fourier Transformation Spectroscopy (FTIR) dan Energy Dispersion Spectroscopy (EDS) dipergunakan untuk menentukan jenis degradasi yang terjadi dan komposisi aditif pada pipa. Sebagai perbandingan, dikaji pula sifat-sifat yang terdapat pada pipa PVC lain, pada sistem pemanas yang sama, yang masih dapat bertahan tanpa mengalami kegagalan. Berdasarkan hasil analisa kondisi kerja dan permukaan kerusakan, disimpulkan bahwa pipa PVC mengalami proses degradasi pada waktu yang lama akibat *creep* dan *fatigue*. Hasil ini ditunjang oleh hasil karakterisasi yang menunjukkan bahwa, walaupun pada temperatur kamar kekuatan pipa masih berada di bawah batas yang diijinkan, temperatur transisi gelas telah mengalami penurunan sampai di bawah temperatur kerja. Dari hasil spektroskopi FTIR diketahui bahwa pipa PVC telah mengalami degradasi panas (dehidroklorinasi) dan bukan terbuat dari pipa Chlorinated PVC yang biasa dipakai pada temperatur tinggi. Dibandingkan dengan pipa PVC lain yang masih bertahan, pipa PVC yang gagal mengalami degradasi panas yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh tingginya kadar CaCO_3 yang melebihi batas standar dan adanya TiO_2 sebagai bahan aditif PVC.

Kata kunci: analisis kegagalan, PVC, pipa, dehidroklorinasi

Pendahuluan

Pemakaian material plastic/polimer telah berkembang pesat dan merambah pada aplikasi konstruksi. Cukup banyak produk yang sebelumnya terbuat dari logam digantikan oleh polimer. Dibandingkan dengan logam, pada umumnya polimer memiliki masa jenis yang sangat rendah, ketahanan terhadap bahan kimia yang tinggi dan bervariasi, harga per volume yang relatif murah serta kemudahan dalam pemrosesan. Dibalik keunggulan tersebut, beberapa hal yang perlu diperhatikan dan berhubungan dengan kelemahan material polimer adalah: sifat mekanik yang rendah; ketahanan temperatur yang rendah; variasi sifat yang tinggi dan sangat bergantung pada aditif di dalamnya; serta informasi yang relatif sedikit dalam hal ketahanan polimer di suatu lingkungan dalam kurun waktu tertentu. Ketahanan polimer terhadap *creep*, *fatigue* atau ESC (*Environmental Stress Cracking*) sangat diperlukan pada penerapan polimer sebagai produk konstruksi di suatu lingkungan dengan temperatur tinggi, bahan kimia tertentu, sinar ultra violet atau kadar uap air tinggi. Oleh sebab itu, kegagalan produk polimer bisa sangat berbeda dengan produk logam. Salah satu modus utama kegagalan polimer biasanya disertai dengan perubahan sifat polimer terhadap waktu dan temperatur (yang relatif rendah dibandingkan dengan logam). Sifat mekanik kebanyakan polimer dapat berubah drastis akibat perubahan temperatur yang relatif kecil.

PVC (*Poly Vinyl Chloride*) termasuk polimer serbaguna yang dipergunakan untuk berbagai kebutuhan, mulai dari bungkus makanan sampai untuk bagian badan kendaraan bermotor. Untuk memperoleh variasi sifat yang diinginkan, resin PVC dapat dikombinasikan dengan banyak bahan aditif dan *modifiers*. Diantara sekian banyak material polimer, PVC sering dipilih karena harganya yang murah, serbaguna dan sifat-sifat yang dimilikinya (kuat, tahan lama,

tahan abrasi dan kelembaban, tahan korosi, isolator listrik dan panas). Produk PVC komersial biasa digunakan dalam bentuk kaku seperti pipa atau dalam bentuk fleksibel seperti kain, pembungkus kabel dan makanan. Variasi sifat – sifat mekanik PVC komersial dapat dilihat pada Tabel I.

Tabel I. Sifat mekanik PVC komersial [1].

Sifat Mekanik	Kaku	Fleksibel
Massa jenis (gr/cm ³)	1,03 – 1,58	1,16 – 1,35
Kekuatan tarik (MPa)	41,4 – 51,7	22,1 – 33,8
Modulus Elastisitas (GPa)	2,41 – 4,14	1,79 – 3,24
Elongasi saat patah (%)	2 – 80	13 – 50
Harga Impak, Izod bertakik (J/m)	21,4 – 1068	26,7 – 587
Temperatur defleksi panas (°C pada 0,455MPa)	57 – 82	75 – 95

PVC memiliki ketahanan panas yang rendah. Pada temperatur tertentu, PVC dapat melepaskan atom klor sehingga mendorong terjadinya dehidroklorinasi [2]. Hal ini akan mengakibatkan terjadi penurunan sifat PVC. Untuk memperbaiki ketahanan panas, biasanya dilakukan penambahan bahan penstabil panas. Selain itu, dapat pula dilakukan proses klorinasi sehingga diperoleh PVC yang mengandung banyak klor atau sering disebut *Chlorinated PVC* (CPVC) [3, 4].

PVC secara khusus banyak digunakan dalam bidang konstruksi. Salah satu contoh yang banyak dilihat adalah penggunaan PVC sebagai pipa air. Penerapan pipa PVC untuk instalasi saluran air, termasuk pada sistem air panas, sudah banyak dan umum dipergunakan. Pipa yang digunakan pada sistem pemanas air biasanya terbuat dari CPVC. Selama pengoperasiannya, pipa pada sistem pemanas air menerima pembebanan akibat panas dan tekanan dari air di dalamnya.

Penelitian ini membahas kegagalan yang terjadi pada pipa PVC suatu saluran sistem pemanas air rumah tangga. Analisis kegagalan dilakukan untuk mencari penyebab kegagalan, sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan agar masalah serupa dapat dihindarkan.

Metodologi

Dalam makalah ini dibahas langkah-langkah analisis untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan: “*what happened?*, *how it happened?* dan *why it happened?*”.

Langkah pertama dilakukan dengan cara mendeskripsikan sistem pemanas air untuk mengetahui data lingkungan kerja pipa PVC. Kondisi kerja pipa PVC tersebut meliputi : tekanan internal air, temperatur, dan lokasi pipa. Selanjutnya pemeriksaan visual, makroskopik dan mikroskopik dilakukan untuk mengevaluasi bentuk dan modus kerusakan fisik yang terjadi seperti ada tidaknya deformasi, perubahan dimensi, bentuk kerusakan dan perubahan warna.

Sifat fisik dan mekanik dikarakterisasi dengan menggunakan uji tarik, Differential Scanning Calorimetry (DSC) dan metode viskosimetri. Pengujian tarik dilakukan sesuai dengan ASTM D 638-72 dengan laju penarikan 1 mm/menit. DSC dengan instrumen Seiko dilakukan dengan lingkungan pengujian N₂, dan laju pemanasan 5°C/menit. Metode viskosimetri digunakan untuk memprediksi berat molekul dengan cara melarutkan PVC dalam tetrahidrofurane sehingga diketahui viskositas intrinsik yang merupakan fungsi berat molekul rata-rata.

Fourier Transformation Spectroscopy (FTIR) dan *Energy Dispersion Spectroscopy* (EDS) dipergunakan untuk menentukan jenis degradasi yang terjadi dan komposisi aditif pada pipa. Sebagai perbandingan, dikaji pula sifat-sifat yang terdapat pada pipa PVC lain, pada sistem pemanas yang sama, yang masih dapat bertahan tanpa mengalami kegagalan.

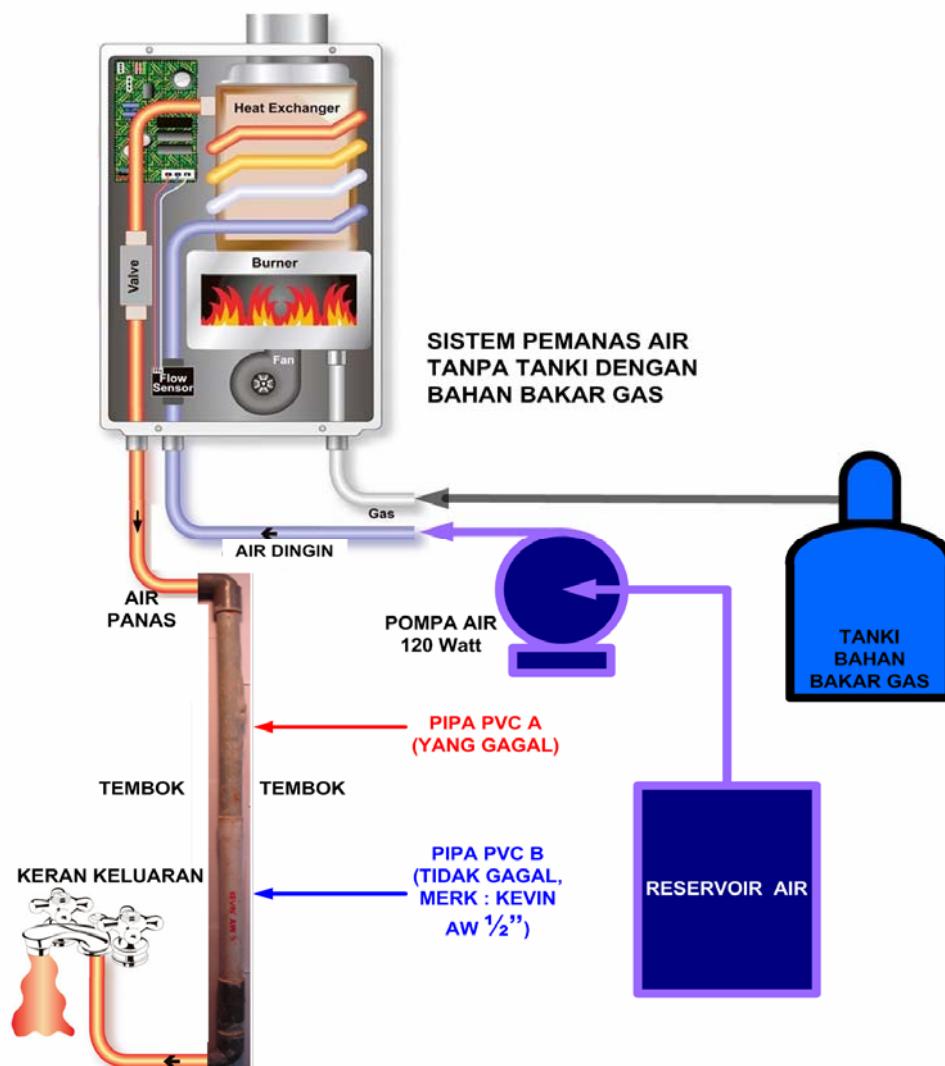
Hasil dan Pembahasan

Bagian ini memaparkan deskripsi sistem pemanas, data kondisi kerja, hasil pemeriksaan berserta pembahasan dan analisis kegagalan pipa PVC.

Deskripsi Sistem Pemanas dan Lingkungan Kerja Pipa PVC

Instalasi sistem pemanas air rumah tangga ditunjukkan pada Gambar 1. Pipa PVC saluran air panas dengan diameter $\frac{1}{2}$ " berada dalam tembok dengan posisi vertikal. Pada saluran air panas tersebut terdapat dua jenis pipa PVC yang disambungkan menjadi satu. Satu batang pipa PVC mengalami kegagalan, sedangkan pipa PVC lainnya masih dapat bertahan. Kondisi operasi dan lingkungan kerja pipa PVC adalah sebagai berikut :

- Waktu pemakaian sekitar 2 tahun.
- Tekanan internal (gage) antara 0,1 MPa - 0,26 MPa. Kondisi ini menghasilkan tegangan hoop (σ_h) antara 0,99 MPa – 2,6 MPa.
- Temperatur air antara 20°C dan 80°C.
- Lokasi pipa berada di dalam tembok.

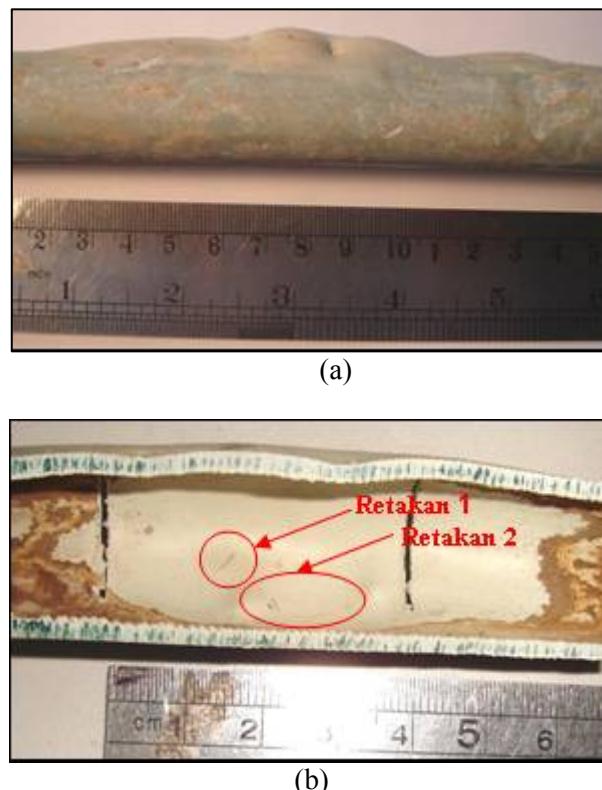


Gambar 1. Sistem pemanas air dan lokasi pipa PVC yang mengalami kegagalan.

Hasil dan Analisis

Hasil pemeriksaan visual pada permukaan luar dan dalam pipa PVC yang gagal memperlihatkan adanya deformasi plastis (Gambar 2a), perubahan warna (Gambar 2a), dan retakan (Gambar 2b). Deformasi plastis yang terjadi menyebabkan diameter pipa membesar sehingga pada bagian tersebut terlihat adanya bagian yang menggelembung. Perubahan warna yang lebih cerah terjadi pada daerah yang berdeformasi plastis. Retakan dimulai dari sisi dalam pipa dan dapat menjalar sampai ke sisi luar pipa. Seluruh retakan yang terlihat berada pada

daerah pipa yang telah menggelembung. Retakan yang telah menembus tebal pipa ditunjukkan pada Gambar 2b. Retakan ini yang menyebabkan terjadinya kebocoran air pada saluran pipa.



Gambar 2. Permukaan pipa PVC yang mengalami kegagalan (a) sisi luar pipa (b) sisi dalam pipa

Hasil pengujian fisik dan mekanik terhadap pipa PVC yang mengalami kegagalan (PVC A) dan yang masih bertahan (PVC B) ditunjukkan pada Tabel II. Dari hasil pengujian tersebut dapat terlihat bahwa setelah dua tahun pemakaian PVC B masih memiliki sifat yang lebih baik dibandingkan dengan PVC A. Dengan asumsi kedua PVC memiliki sifat yang sama pada awal pemakaian, dapat dilihat bahwa telah terjadi degradasi yang cukup besar pada pipa PVC A. Hal ini sekaligus menunjukkan mengapa PVC B masih dapat bertahan tanpa mengalami kegagalan dibandingkan dengan PVC A.

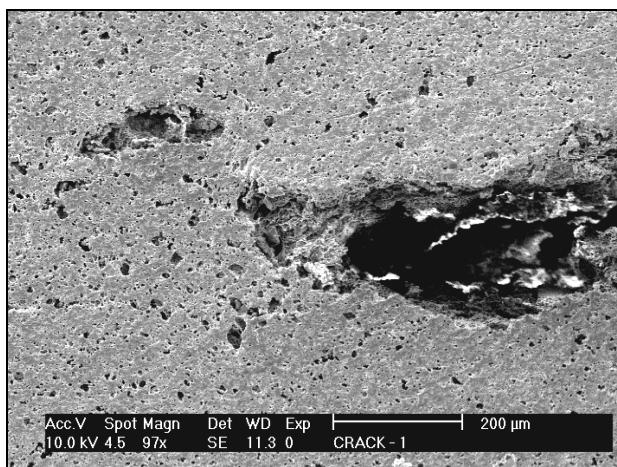
Tabel II. Perbandingan hasil uji pipa PVC

Sifat Mekanik dan Fisik	Hasil Uji Pipa PVC	
	PVC A (Gagal)	PVC B (Bertahan)
Kekuatan Tarik (σ_u), MPa	11,18	23,48
Kekuatan Luluh (σ_y), MPa	12,19	23,69
Elongasi saat patah, %	1,5	9,6
Modulus Tarik (E), GPa	3,4	2,72
Temperatur Transisi Gelas, Tg	79,3°C	83,1°C
Berat Molekul Rata-rata (Mw)	20.000	26.000

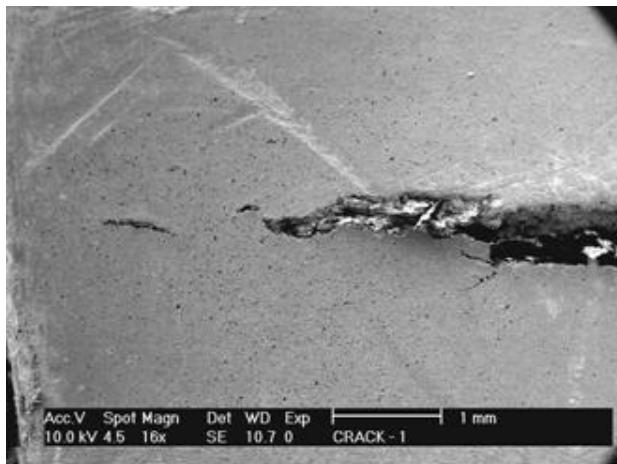
Dari tabel II diperlihatkan bahwa pipa PVC yang mengalami kegagalan memiliki kekuatan, σ_y , sebesar 12,2 MPa. Nilai tersebut masih jauh berada di atas tegangan hoop maksimum, σ_H , yang bekerja pada dinding pipa (2,6 MPa). Hal ini menunjukkan bahwa deformasi plastis yang terjadi pada pipa tidak terjadi pada temperatur kamar melainkan pada temperatur yang lebih tinggi. Dengan nilai Tg (79,3°C) yang berada di bawah temperatur operasi maksimum (80°C), deformasi plastis pada pipa yang mengalami kegagalan dimungkinkan terjadi pada temperatur tinggi. Deformasi plastis pada temperatur tinggi ini dapat diakibatkan oleh dua

hal yaitu: kekuatan luluh yang menurun pada temperatur tinggi sehingga berada di bawah tegangan hoop maksimum, atau akibat tegangan konstan di bawah kekuatan luluh pada temperatur tinggi yang bekerja dalam waktu yang relatif panjang.

Pemeriksaan lebih lanjut dengan SEM (*Scanning Electron Microscope*) pada daerah retakan memperlihatkan adanya pori-pori mikro yang memacu terbentuknya penjalaran retak (Gambar 3). Pori-pori mikro yang terbentuk hanya pada daerah yang mengalami deformasi plastis menunjukkan bahwa deformasi plastis terbentuk akibat *creep* pada temperatur tinggi. Sedangkan adanya penjalaran retakan yang melewati pori mikro menunjukkan adanya fenomena *fatigue* yang juga terjadi akibat beban dinamik pada pipa PVC. Beban dinamik terjadi akibat tekanan dan temperatur yang berubah-rubah. Sifat getas (elongasi maksimum = 1,5%) yang dimiliki oleh pipa PVC yang mengalami kegagalan menunjukkan kemungkinan terjadinya proses *fatigue* tersebut.



(a)

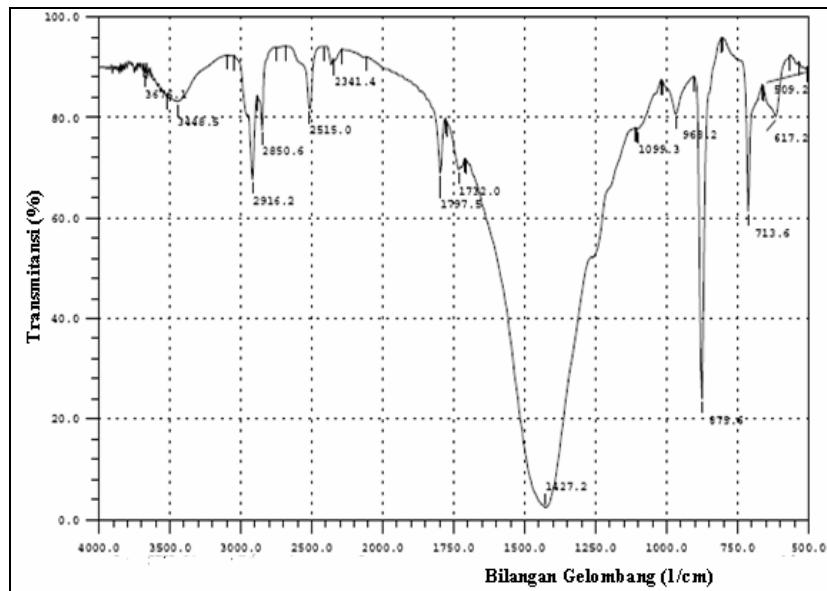


(b)

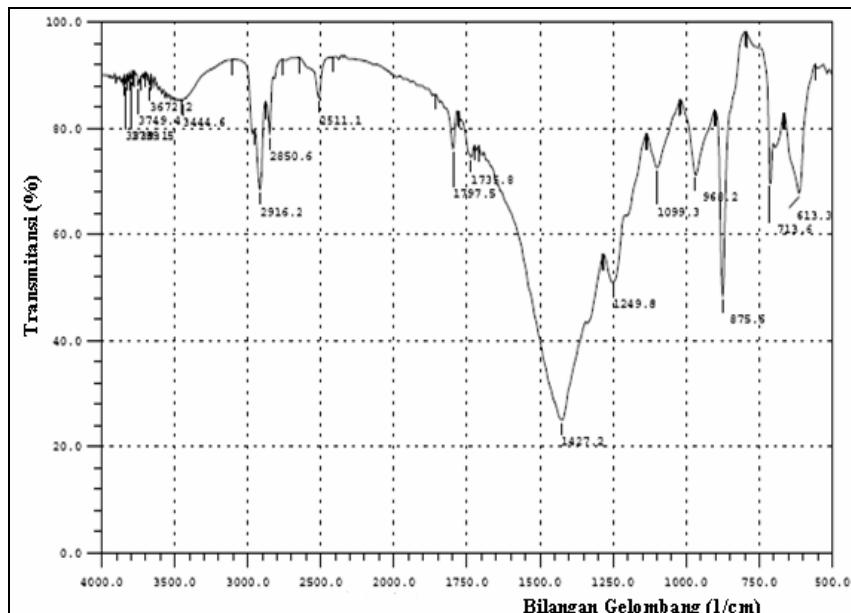
Gambar 3. Perbesaran daerah retakan pada sisi dalam pipa
(a) pori mikro pada daerah yang berdeformasi plastis (a) penjalaran retak pada pori mikro

Pori mikro yang terdapat pada daerah yang menggelembung merupakan mekanisme molekular pada polimer akibat pemutusan rantai, pemutusan ikatan atau pelepasan komponen tertentu dari polimer [5]. Hal ini dapat dilihat pada Tabel II dimana pada pipa PVC A (yang mengalami kegagalan) kemungkinan telah terjadi penurunan berat molekul dan T_g yang cukup besar. Reaksi-reaksi ini merupakan mekanisme yang terjadi pada degradasi polimer yang dipicu oleh faktor lingkungan. Degradasi pada PVC dapat ditimbulkan oleh panas, sinar ultra violet, beban mekanik, bahan kimia (asam/basa) dan kombinasinya [2, 6, 7, 8].

Rendahnya Tg pipa PVC yang gagal memungkinkan terjadinya degradasi PVC akibat temperatur tinggi. Hal ini ditunjang oleh hasil karakterisasi FTIR yang menunjukkan indikasi terjadinya dehidroklorinasi akibat degradasi panas. Dari spektrum FTIR terdapat daerah serapan ikatan rangkap ($R_2C=CH_2$) dan gugus karbonil ($C=O$) yang menunjukkan bahwa kedua pipa PVC (PVC A dan PVC B) mengalami degradasi panas (Gambar 4). Dengan memperhatikan absorbansi $R_2C=CH_2$ dan $C=O$, terlihat bahwa dehidroklorinasi yang dialami pipa PVC yang gagal (PVC A) lebih besar daripada pipa PVC yang bertahan (PVC B). Disamping itu jumlah spesi CH_3 yang lebih banyak pada pipa PVC yang gagal, mengakibatkan pipa tersebut lebih mudah mengalami dehidroklorinasi daripada pipa PVC yang bertahan. Kombinasi dari dehidroklorinasi dan pemutusan rantai saat deformasi plastis akan mengakibatkan terbentuknya gugus poliena dan radikal makroalkil sehingga, secara fisik, terjadi perubahan warna pada pipa PVC A [2, 9].



(a)



(b)

Gambar 4. Spektrogram PVC hasil karakterisasi FTIR
(a) pipa PVC yang gagal (b) pipa PVC yang bertahan

Dari hasil FTIR ditunjukkan pula bahwa kedua pipa PVC tersebut memiliki jenis-jenis ikatan dalam rantai molekul yang sama. Lebih jauh lagi, terlihat bahwa kedua pipa PVC bukan dari jenis CPVC, karena tidak terdapat absorbansi karakteristik C=Cl pada bilangan gelombang 800, 750, 720 cm⁻¹. Selain itu dari harga Tg dapat diperkirakan pula bahwa kedua PVC bukan termasuk dalam material kategori CPVC yang memiliki Tg 115⁰-135⁰C [3, 4].

Terjadinya dehidroklorinasi pada PVC dengan tingkat degradasi yang berbeda dipengaruhi oleh kadar dan jenis aditif didalamnya. Dari hasil spektroskopi EDS terhadap kedua pipa PVC diperoleh perkiraan jenis dan kadar aditif seperti terlihat pada Tabel III. Pipa PVC yang gagal memiliki jenis aditif TiO₂ dan jenis CaCO₃ dengan kadar yang melebihi standar ASTM 1784 (30,74% dibandingkan dengan 20% berat) [10]. Adanya TiO₂ akan mempercepat dehidroklorinasi sedangkan kadar CaCO₃ yang terlalu tinggi akan menurunkan ketahanan sifat mekanik jangka panjang [11, 12]. Kedua hal inilah yang membuat pipa PVC A lebih rentan mengalami kegagalan akibat dehidroklorinasi dibandingkan dengan pipa PVC B.

Tabel III. Jenis aditif dan pengaruhnya terhadap PVC

Jenis unsur	Komposisi % berat		Aditif	Pengaruh
	PVC A	PVC B		
Kalsium (Ca)	30,74	10,57	Kalsium karbonat (CaCO ₃), bahan pengisi	Meningkatkan sifat mekanik jangka pendek, bereaksi dalam jangka panjang menghasilkan air.
Titanium (Ti)	2,90	-	Titanium Dioksida (TiO ₂) lazimnya digunakan sebagai bahan pewarna	Bersifat inert sehingga mempercepat dehidroklorinasi
Silikon (Si)	0,79	2,71	Silika (SiO ₂) digunakan sebagai bahan pewarna	Bersifat inert sehingga mempercepat dehidroklorinasi

Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

- Kegagalan pada pipa PVC di sistem saluran pemanas air rumah tangga disebabkan oleh pemakaian material yang tidak sesuai dengan lingkungan kerja.
- Kegagalan dini yang terjadi pada satu pipa PVC diakibatkan oleh perbedaan kadar dan jenis aditif yang tidak sesuai dengan standar.
- Dalam proses kegagalan terjadi fenomena dehidroklorinasi, *creep* dan *fatigue*.
- Pemakaian pipa PVC untuk saluran air panas sebaiknya menggunakan pipa berbahan CPVC atau PVC dengan bahan aditif yang tepat.

Daftar Pustaka

1. Fried, J.R., 1995, “*Polymer Science and Technology*”, Prentice-Hall International, London.
2. Amri, T.A, 1987, “*Pengaruh Termal terhadap Degradasi Lempeng PVC dengan Komposisi Tertentu*”, Tesis Magister, Departemen Kimia, Institut Teknologi Bandung, 1987.
3. Merah, N., Irfan-ul-Haq M., Khan Z., 2003, “*Temperature and weld-line effects on mechanical properties of CPVC*,” Journal of Materials Processing Technology 142, 247–255.
4. Kang, J. S., Lee, S. H., Huh, H., Shim, J. K., Lee, Y. M., 2003, “*Preparation of Chlorinated Poly(vinyl chloride)-g-Poly(Nvinyl-2-pyrrolidinone) Membranes and Their Water Permeation Properties*”, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 88, 3188–3195.

5. Butu, R. B., 1999, "A Comprehensive literature review of liner failures and longevity", Center for Marine Structures and Geotechnique, Department of Ocean Engineering, Florida Atlantic University.
6. Wirjosentono, B, 1984, "Fotodegradasi Lempeng PVC dalam Lingkungan Udara, Air dan Larutan Natrium Klorida", *Tesis Magister*, Departemen Kimia, Institut Teknologi Bandung.
7. Braun, D., 1975, "Degradation and Stabilization of Polymers", Applied Science, London.
8. Muzakkar, M. Z., 1996, "Pengaruh Substituen dalam Rantai Poly Vinyl terhadap lama Penyinaran dengan Sinar UV", *Tesis Magister*, Departemen Kimia, Institut Teknologi Bandung.
9. Kasra, 1990, "Degradasi PVC oleh Elektrolit pada Kondisi di Bawah dan di Atas Temperatur Transisi Gelas, Skripsi, Departemen Kimia, Institut Teknologi Bandung.
10. ASTM D 1784, 1981, "Standard Specification for Rigid Poly (Vinyl Chloride) (PVC) Compounds and Chlorinated Poly (Vinyl Chloride) (CPVC)".
11. Karayildirim, T., Yanik, J., Yuksel, M., Saglam, M., Vasile, C., Bockhorn, H., 2006, "The Effect of Some Fillers on PVC Degradation," *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 75, 112–119
12. Rinker Materials, 1992, "Filler used in PVC Pipe", Rinker group, <http://www.rinker.com>