

ANALISIS *REMOVAL SCALING* SILIKA PADA JALUR RE-INJEKSI *BRINE* PEMBANGKIT LISTRIK ENERGI PANAS BUMI DENGAN MENGGUNAKAN ASAM FLUORIDA

Adhi Setiawan^{1*}, Deris Eko Saputro², dan Agung Nugroho³

¹Program Studi Pengolahan Limbah, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

^{2,3}Program Studi Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

*e-mail: adhistw23@gmail.com

Abstract

Silica scale formation on the brine re-injection lines of geothermal power plants can lead to serious problems because it increased pressure drop and failure of the safety devices. One of the most effective methods to solve the problem is acidification of silica scaling using hydrofluoric acid (HF). HF has a unique characteristic that is highly reactive with SiO₂, easily obtained in the market and cheap. The use of HF can increase the rate of material corrosion in re-injection lines material. The use of HF should be adjusted to the appropriate concentration so it can dissolve silica scale optimally without shortening its life service. The concentration of HF used in the experiment were 5, 10, and 15% wt. The results showed that the optimum concentration of HF in dissolving silica at 15%. This is due to its ability to dissolve the crust mostly greatest than most other concentration that is equal to 21% of the total dissolved silica. The rate of corrosion on the material re-injection line with a concentration of 15% is equal to 0.647 mm/y and provide about 4.63 years life time of pipe.

Keywords: Silica Scaling, Hidrofluoric Acid, Corrosion, Geothermal, Brine.

Abstrak

Pembentukan kerak silika pada jalur re-injeksi brine pembangkit tenaga panas bumi dapat menyebabkan masalah serius karena dapat meningkatkan pressure drop dan kegagalan pada peralatan keamanan. Salah satu metode yang paling efektif untuk mengatasi masalah scaling silika yaitu melakukan pengasaman menggunakan asam hidrofiorida (HF). Hal ini disebabkan HF memiliki karakteristik unik yaitu sangat reaktif dengan SiO₂, mudah diperoleh di pasaran serta harganya relatif murah. Penggunaan HF dapat meningkatkan laju korosi pada material jalur re-injeksi. Penggunaan HF harus disesuaikan dengan konsentrasi juga sehingga dapat melarutkan kerak silika secara optimal tanpa memperpendek umur pelayanan dari pipa. Konsentrasi HF yang digunakan pada eksperimen antara lain 5%, 10%, dan 15% berat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi optimum HF dalam melarutkan kerak silika sebesar 15 %. Hal ini disebabkan kemampuannya dalam melarutkan kerak paling besar dibanding konsentrasi lainnya yaitu sebesar 21% dari total silika yang

dilarutkan. Laju korosi pada material jalur re-injeksi dengan konsentrasi 15% yaitu sebesar 0,647 mm/y dan memberikan life time pipa sebesar 4,63 tahun.

Kata kunci: *Scaling Silika, Asam Hidroflorida, Korosi, Panas Bumi, Brine.*

1. PENDAHULUAN

Asam hidroflorida (HF) merupakan salah satu jenis bahan kimia yang seringkali digunakan dalam bidang industri maupun akademik sebagai prekursor berkembangnya berbagai produk dan bahan. Sejumlah besar *crude* asam hidroflorida pertama kali diproduksi oleh Carl Wilhelm pada tahun 1771 (Genuino dkk, 2012).

Asam hidroflorida terbentuk dari salah satu unsur halogen fluorin yang merupakan unsur peringkat ke-13 yang jumlahnya cukup melimpah dikerak bumi (Mitra dan Rimstidt, 2009). Jumlah unsur fluorin merupakan yang terbanyak diantara unsur halogen lainnya serta kelimpahannya lima kali lebih banyak bila dibandingkan dengan unsur klorin. Meskipun lebih banyak daripada klorin, konsentrasi fluorin di perairan alami umumnya jauh lebih rendah daripada klorin karena fluorin lebih reaktif dan sebagian dari fluorin tersimpan dalam bentuk kation di bebatuan selama proses pelapukan. Sedangkan Silikon adalah unsur yang paling melimpah kedua di kerak bumi dan oksigen adalah unsur yang paling melimpah sehingga tidak mengejutkan bahwa 88% dari semua mineral berbentuk silikat. Di kerak bumi hampir 70% oksigen terikat dengan silikon dan hampir semua mineral berbasis silikon memiliki oksigen di dalam ikatannya. Oleh karena itu, reaksi yang melibatkan ikatan Si-O merupakan aspek yang penting dalam geokimia (Mitra dan Rimstidt, 2009).

Penggunaan asam hidroflorida pada umumnya digunakan pada proses *glass etching*, membersihkan kerak, dan produksi bahan bakar dengan oktan tinggi (Genuino dkk, 2012). Kelarutan HF memainkan peranan penting dalam teknologi industri misalnya pada industri *etching* silika dan gelas silika, industri batu, *micromaching* permukaan, *etching glass fiber*, serta berperan menciptakan permukaan kaca buram dalam aspek dekoratif. Pembuatan kaca buram dilakukan dengan mengetsa (mengukir) permukaan kaca disertai dengan penambahan ion ammonium atau kalium agar terbentuk endapan fluorosilikat pada permukaan dan mengontrol pola etsa (Barboux dkk, 2004).

HF memiliki kemampuan yang baik dalam melarutkan silika sehingga HF dapat digunakan untuk melarutkan silika yang terdeposit pada permukaan bagian dalam dari perpipaan serta alat penukar panas (*heat exchanger*) yang menggunakan fluida geotermal. Mineral silika yang terlarut di fluida geotermal berasal dari batuan sekitarnya akibat kondisi suhu tinggi dari reservoir panas bumi dan berada dengan kondisi kesetimbangan dengan batuan induk. Silikat (silika murni dan silikat logam) memiliki kelarutan yang meningkat seiring dengan meningkatnya suhu larutan dan diperkirakan dapat membentuk deposit dipenukar panas atau pipa. Deposit silika telah dilaporkan disebagian besar pembangkit tenaga panas bumi dan di beberapa penukar panas bumi,

namun laju deposisi dan sifat mekanik bervariasi dari setiap industri (Zarrouk dan Moon, 2014).

Aliran fluida geotermal (*brine*) di dalam peralatan produksi seringkali dipengaruhi oleh masalah *scaling* atau deposit silika. Hal ini menyebabkan terjadinya penurunan energi yang diekstrak serta mengarah pada kerugian pembangkit listrik karena *shut down* serta biaya tambahan untuk membersihkan deposit pipa (Kashpura dan Potapov, 2000). Deposit pada penukar panas juga mengakibatkan meningkatnya hambatan perpindahan panas sebagaimana menurunnya konduktivitas termal sehingga koefisien perpindahan panas *overall* menurun. Hal ini yang menyebabkan penurunan *performance* penukar panas (Zarrouk dkk, 2014).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pencampuran *separated brine* dengan *steam* kondensat dapat mengurangi masalah *scaling* silika. Namun, pH yang rendah dari campuran fluida *brine* dan kondensat menyebabkan munculnya *scaling* stibnite (Sb_2S_3) pada unit penukar panas di beberapa pembangkit listrik tenaga panas bumi di New Zealand. Ditemukan bahwa penurunan pH merupakan penyebab utama *scaling* stibnit di Rotokawa sedangkan penurunan suhu menyebabkan *scaling* dalam Ngawha lebih signifikan (Wilson dkk, 2007). Gallup (2011) serta Gunnarson dan Arnórsson (2005) melaporkan bahwa metal silikat ditemukan didalam fluida geotermal. Beberapa komponen yang ada didalam fluida geotermal antara lain Al, Fe, dan Mg. Komponen metal silikat memiliki kelarutan yang lebih rendah dibandingkan

dengan silika murni sehingga lebih sukar dalam pembersihan dan pencegahannya.

Inanli dan Atilla (2011) melaporkan bahwa didalam fluida geothermal (panas bumi) terdapat kandungan logam silikat yang memiliki kelarutan relatif rendah sehingga berpotensi menimbulkan masalah kerak yang sulit dibersihkan terutama didalam alat penukar panas pada pembangkit listrik tenaga panas bumi di Tuzla Turki. Logam silikat membentuk larutan garam dengan kandungan magnesium dan besi (Mg/Fe) yang relatif tinggi. Magnesium silikat atau campuran magnesium-besi silikat memiliki kelarutan yang sangat rendah terutama setelah melalui proses pemisahan uap dari *brine* disertai dengan penurunan suhu sehingga menyebabkan logam silikat mengendap. Utami dkk (2014) melakukan studi tentang pengaruh temperatur dan pH larutan pada pembentukan deposit silika pada pembangkit listrik tenaga panas bumi Dieng Jawa Tengah. Hasil penelitian tersebut melaporkan bahwa kelarutan silika akan meningkat seiring dengan meningkatnya pH dan temperatur larutan. Bahkan pada laju alir massa aliran fluida yang tinggi mengakibatkan laju deposisi silika amorf semakin tinggi.

Beberapa kelebihan penggunaan HF dalam upaya mengatasi masalah *scaling* silika pada jalur re-injeksi pembangkit tenaga panas bumi area Ulubelu antara lain HF memiliki karakteristik unik (sangat reaktif dengan SiO_2), mudah didapatkan di pasaran, serta murah. Selain itu HF tidak menimbulkan pencemaran setelah bereaksi dengan kerak silika sehingga kemungkinan mempengaruhi *reservoir* panas bumi juga sedikit. Namun, pengasaman menggunakan HF memiliki dampak negatif yaitu

meningkatkan laju korosi pada pipa dan komponen lainnya. Pada penelitian ini akan dibahas pengaruh konsentrasi HF serta waktu immersi terhadap kelarutan kerak silika didalam larutan HF dalam upaya mengatasi masalah *scaling* silika pada jalur re-injeksi. Data kelarutan yang diperoleh akan dikombinasikan dengan laju korosi sehingga akan diperoleh konsentrasi optimum dalam melarutkan silika serta memiliki dampak korosi yang paling rendah.

2. METODE PENELITIAN

Pengujian Sampel Kerak Silika

Pengujian dilakukan untuk mengetahui dan memastikan kandungan utama dari kerak serta air *brine*. Sampel kerak (Gambar 1) dan air *brine* diperoleh dari pada jalur re-injeksi pembangkit panas bumi area Ulubelu. Pengujian kandungan silika dari sampel dilakukan dengan menimbang sampel kerak sebanyak 1 gram dilanjutkan dengan pemanasan sampel pada suhu 900°C di dalam *furnace* selama 60 menit. Sampel yang sudah dipanaskan selanjutnya didinginkan dan ditimbang massanya. Setelah didinginkan, sampel dipanaskan kembali pada kondisi yang sama seperti sebelumnya hingga massanya konstan. Hal ini dilakukan untuk menguapkan komponen organik dan oksida besi yang ada didalam kerak. Setelah proses pemanasan selesai dilanjutkan dengan menambahkan 4 tetes larutan asam sulfat 20 N dan 20 ml asam florida pekat pada residu kerak sehingga kerak larut. Memanaskan sampel tersebut pada suhu 100°C untuk menguapkan pelarut dan dilanjutkan dengan memanaskan sampel kerak pada suhu 900°C selama 10 menit. Sampel selanjutnya didinginkan dan

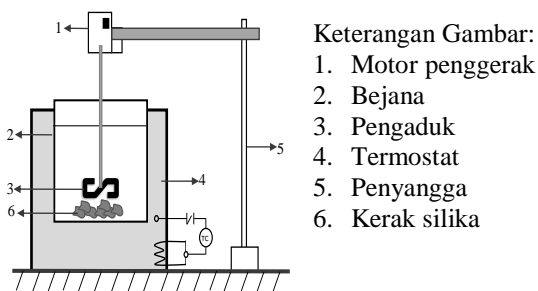
ditimbang massanya. Mengulangi pemanasan sampel pada suhu 900°C dan menimbangnnya hingga massanya konstan. Jumlah massa yang hilang akibat pemanasan pada suhu 900°C tersebut merupakan kandungan silika didalam kerak.



Gambar 1. Kerak Silika.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kerak memiliki kandungan SiO₂ (86,15%), Ca (0,47%), Mg (1,49%), dan lain-lain (11,89%). Sedangkan kandungan SiO₂ terlarut pada *brine* sebesar 877 mg/l. Hal ini menunjukkan bahwa adanya kandungan silika berpotensi menyebabkan potensi deposit pada jalur re-injeksi. Pengujian selanjutnya dilakukan untuk mengetahui kemampuan berbagai konsentrasi HF dalam melarutkan kerak silika dalam kondisi jenuhnya. Air *brine* dan sampel kerak silika yang diperoleh dari deposit pada jalur re-injeksi pembangkit panas bumi Ulubelu. Larutan pengujian menggunakan larutan asam flourida atau HF 55% wt (Merck) yang telah diencerkan dengan air *brine* sehingga diperoleh larutan HF dengan konsentrasi masing-masing 5%, 10%, dan 15% wt. Sebanyak 50 gram sampel kerak silika selanjutnya dilarutkan ke dalam larutan HF yang konsentrasinya telah ditentukan sebelumnya. Pada setiap konsentrasi HF besarnya perbandingan

massa larutan HF terhadap massa kerak sebesar 5:1 (250 g larutan HF: 50 gr kerak silika); 10:1 (500 g larutan HF: 50 gr kerak silika); dan 15:1 (750 g larutan HF: 50 gr kerak silika). Proses pelarutan kerak silika dilakukan pada kondisi temperatur 90°C dan kecepatan putaran pengaduk dalam bejana sebesar 520 rpm sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Set Up Peralatan Uji Kelarutan Kerak Silika.

Apabila larutan sudah mencapai titik jenuh yang ditandai dengan tidak melarutnya sampel kerak silika setelah mengalami proses pelarutan selama 24 jam, maka selanjutnya endapan kerak disaring dan dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C selama 3 jam untuk menghilangkan sisa pelarut. Setelah kering, dilanjutkan dengan penimbangan untuk mengetahui massa kerak silika yang larut. Pengujian pengaruh waktu immersi dilakukan dengan metode yang sama seperti sebelumnya, namun penimbangan massa kerak silika dilakukan pada waktu 5 menit, 10 menit, dan 15 menit setelah proses pengadukan.

Pengujian Korosi

Pengujian dilakukan dengan memakai air *brine* yang sudah ditambahkan HF dengan beberapa konsentrasi (hasil dari pengujian kelarutan SiO₂ pada HF) dan diujikan dengan

material yang sama dengan material pipa re-injeksi. Pengujian laju korosi ini dilakukan menggunakan metode kehilangan massa berdasarkan standart ASTM G-31-72 *Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals* tahun 2004. Material pengujian menggunakan baja karbon rendah/*carbon steel A106/API 5L grade B* yang dipotong menjadi ukuran 30 mm x 40 mm x 3 mm. Sebelum dilakukan uji immersi pada baja, maka dilakukan preparasi permukaan untuk menghilangkan kotoran dan kerak korosi dengan menggunakan kertas amplas dengan grit 120. Setelah dibersihkan, potongan baja dibersihkan dengan aseton dan dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C selama 30 menit. Setelah tahap pengeringan selesai dilanjutkan dengan penimbangan massa sampel baja.

Uji korosi dilakukan dengan merendam potongan baja karbon tersebut pada suhu 90°C dan kecepatan putaran 520 rpm selama 24 jam. Setelah itu sampel dibersihkan dengan aseton dan dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C selama 30 menit serta dilanjutkan dengan penimbangan massa sampel baja untuk mengetahui besarnya massa baja yang hilang akibat korosi. Besarnya laju korosi dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{Laju korosi (CR)} = \frac{KW}{DAT} \quad (1)$$

Satuan laju korosi (*corrosion rate* atau CR) dalam mm/y. K merupakan konstanta laju korosi sebesar 8,76 x 10⁴. W adalah selisih massa baja sebelum dan sesudah immersi (g). D adalah densitas material baja adalah karbon sebesar 7,86 gram/cm³. A adalah luas permukaan sampel (cm²) dan T adalah waktu immersi

(jam). Data laju korosi ini dapat digunakan untuk mengetahui *life time* dari material baja apabila terjadi kontak dengan larutan HF. *Life time* didapat dengan persamaan:

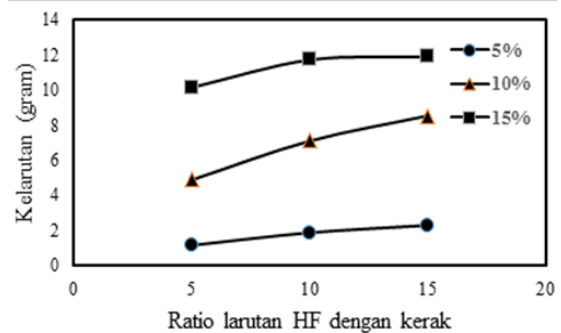
$$RL_R = \left(\frac{CA}{CR} \right) \quad (2)$$

RL_R merupakan *life time* (years), CA adalah *corrosion allowance* material (mm) serta CR adalah laju korosi (mm/y). Produk korosi hasil pengujian immersi yang selanjutnya dikarakterisasi dengan XRD (*X-ray Diffraction*) X'Pert RINT 2200 V Philip CuK α ($\lambda=1,5418 \text{ \AA}$).

3. HASIL DAN DISKUSI

Pada gambar 3 ditunjukkan bahwa kemampuan larutan HF untuk melarutkan kerak silika paling tinggi terdapat pada konsentrasi 15% dan rasio massa larutan HF-kerak silika sebesar 15:1 yang dapat melarutkan hingga 11,92% dari total kerak silika yang dilarutkan, sedangkan paling rendah pada konsentrasi 5% dan rasio massa larutan HF-kerak silika sebesar 5:1 yang hanya dapat melarutkan 1,16% dari total kerak silika yang dilarutkan. Hasil pengujian terhadap dua parameter menunjukkan bahwa parameter konsentrasi memiliki pengaruh yang signifikan dibandingkan dengan pengaruh rasio massa larutan terhadap massa kerak. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 3, pada konsentrasi 15% akan diperoleh kelarutan yang paling maksimal pada semua nilai rasio massa larutan HF dengan kerak silika. Ini menunjukkan bahwa semakin besar konsentrasi larutan HF, maka reaksi antara HF dan SiO₂ akan semakin cepat sehingga jumlah kerak yang terlarut akan semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa kelarutan

silika sebanding dengan konsentrasi larutan HF (Rogers dan Stovall, 2000).



Gambar 3. Grafik Hubungan Konsentrasi dengan Rasio dalam Kelarutan Kerak SiO₂.

Pada Gambar 3 ditunjukkan bahwa meningkatkan rasio larutan HF akan menyebabkan jumlah kerak silika yang meningkat semakin besar. Peningkatan jumlah kerak yang terlarut pada larutan HF terjadi secara signifikan pada rasio larutan-silika antara 5 hingga 10 pada ketiga variasi konsentrasi HF. Hal ini dapat terlihat dari bentuk grafik yang relatif curam. Namun pada rasio larutan-silika sebesar 15 tidak terjadi peningkatan kelarutan kerak silika yang signifikan. Hal ini menandakan bahwa larutan mulai mencapai titik jenuh sehingga kelarutan dari silika menurun. Proses melarutnya kerak silika pada larutan HF disebabkan adanya reaksi antara SiO₂ dengan HF dengan mekanisme reaksi sebagai berikut:

$$4\text{HF}_{(\text{aq})} + \text{SiO}_{2(\text{s})} \rightarrow \text{SiF}_{4(\text{g})} + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{l})}$$

$$6\text{HF}_{(\text{aq})} + \text{SiO}_{2(\text{s})} \rightarrow \text{HSiF}_{6(\text{aq})} + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{l})}$$

Proses melarutnya silika ini disebabkan oleh adanya proses adsorpsi dari molekul HF pada permukaan kristal SiO₂ yang menyebabkan melemahnya ikatan kimia antara Si-O sehingga mengarah pada larutnya silika (Genuino dkk, 2012).

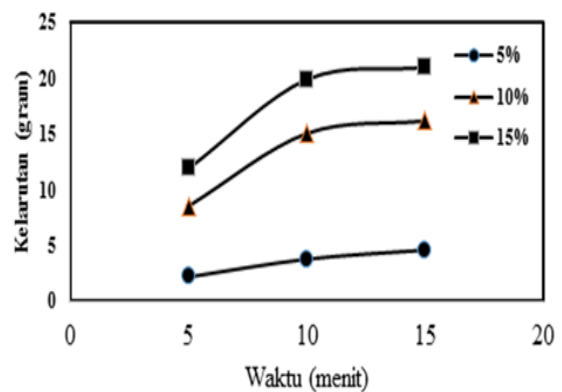
Kondisi jenuh larutan dalam melarutkan suatu zat tidak hanya dipengaruhi oleh rasio massa larutan dengan zat terlarut tetapi juga dipengaruhi oleh waktu reaksi atau waktu immersi. Gambar 4 menunjukkan data kelarutan silika pada rasio massa larutan-kerak 15:1 dengan variasi waktu immersi. Seiring dengan meningkatnya waktu immersi, maka jumlah kerak silika yang larut semakin besar. Dapat dilihat bahwa setelah mencapai waktu 15 menit immersi, maka larutan mendekati titik kejenuhan sehingga peningkatan kelarutan hampir tidak signifikan. Hal ini dapat diamati pada Gambar 4 dimana terjadi peningkatan kelarutan silika yang meningkat secara signifikan antara interval waktu 5 dan 10 menit pada ketiga konsentrasi HF.

Namun pada immersi 15 menit peningkatan kemampuan HF dalam melarutkan silika mengalami penurunan akibat larutan mendekati titik jenuhnya. Kemampuan melarutkan HF dalam melarutkan kerak silika maksimal terjadi pada kondisi konsentrasi larutan HF sebesar 15% dengan waktu immersi 15 menit, yaitu sebesar 21% berat kerak. Sedangkan kemampuan minimal dalam melarutkan kerak silika terdapat pada kondisi konsentrasi larutan HF 5% pada waktu immersi 5 menit, yaitu hanya sebesar 2,2% dari massa kerak yang dilarutkan.

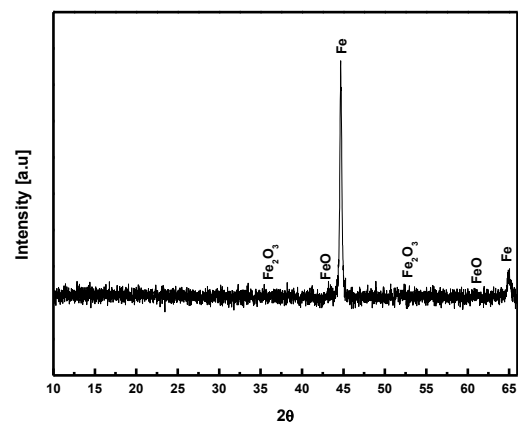
Verifikasi dari pengujian XRD (Gambar 5) menunjukkan adanya fasa Fe_2O_3 dan FeO yang terdeteksi pada grafik XRD sampel baja karbon yang telah terkontak dengan HF selama pengujian korosi.

Gambar 6 menunjukkan hasil pengamatan visual ketiga buah spesimen

baja karbon. Dari hasil pengamatan menunjukkan bahwa pada permukaan baja karbon terdapat kerak berwarna coklat kemerahan yang produk korosi berupa Fe_2O_3 dan FeO .



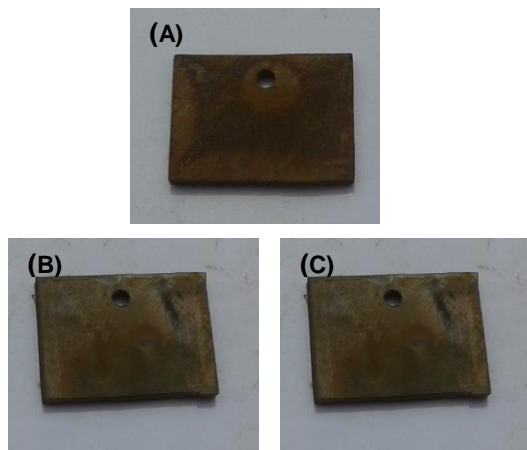
Gambar 4. Grafik Hubungan Waktu Immersi dengan Kelarutan Kerak SiO_2 .



Gambar 5. XRD Sampel Baja Karbon yang Setelah Kontak dengan HF 15%.

Tabel 1 menunjukkan bahwa korosi dihasilkan dengan laju paling cepat pada konsentrasi larutan 15%, yaitu sebesar 4,635 mm/y. Laju korosi terus mengalami penurunan dengan menurunnya konsentrasi larutan HF. Hal ini menunjukkan hubungan bahwa semakin besar konsentrasi larutan HF, maka laju korosi baja karbon yang dialami material pada jalur re-injeksi semakin tinggi. Meningkatnya laju korosi akan berpengaruh pada *life time* dari material

baja karbon. Semakin tinggi laju korosi akibat kontak dengan larutan HF menyebabkan *life time* dari material semakin pendek sehingga berpotensi pada frekuensi penggantian material yang semakin besar.



Gambar 6. Kondisi Baja Karbon Setelah di Immersi dalam Larutan HF (A) 5%, (B)10%, dan (C) 15%.

Tabel 1. Data CA, CR, dan *Life Time* dari Baja Karbon

Konsentrasi HF (%)	CA (mm)	CR (mm/y)	<i>Life Time</i> (years)
5%	3	0,332	9,029
10%	3	0,505	5,944
15%	3	0,647	4,635

Data kelarutan kerak silika yang diperoleh sebelumnya akan dikombinasikan dengan data laju korosi baja karbon pada ketiga variasi konsentrasi untuk memperoleh konsentrasi optimum baik dari segi kelarutan maupun *life time* dari material baja karbon. Pada kondisi lapangan, *life time* jalur re-injeksi diperkirakan dapat bertahan hingga 10 tahun. Namun, akibat munculnya *scaling* silica, maka *life time* jalur re-injeksi maksimal 3 tahun. Hal ini diketahui dari adanya pergantian

komponen-komponen dari jalur re-injeksi setiap *shutdown* yang diadakan 3 tahun sekali.

Dari data tersebut dapat diketahui bahwa konsentrasi HF yang paling optimum yang dapat digunakan untuk pengasaman adalah konsentrasi HF sebesar 15% karena pada konsentrasi tersebut memiliki kemampuan melarutkan kerak silika tertinggi sebesar 21% serta memberikan *life time*, sebesar 4,635 tahun. Dari segi *life time* harga tersebut masih lebih besar dari waktu penggantian rutin pipa yang dilaksanakan setiap 3 tahun sehingga dengan adanya injeksi larutan HF pada konsentrasi 15% dapat menjadi alternatif untuk menyelesaikan masalah *scaling silika* pada jalur re-injeksi yang terjadi di pembangkit tenaga panas bumi di area Ulubelu.

4. KESIMPULAN

Scaling silika yang terdapat pada jalur re-injeksi *brine* pembangkit panas bumi panas bumi area Ulubelu dapat dikurangi dengan menggunakan asam hidrofleurida (HF). Hal ini ditandai dengan kemampuan HF yang mampu melarutkan kerak silika dengan baik. Hasil eskperimen menunjukkan meningkatnya rasio massa larutan-kerak, konsentrasi larutan HF, serta waktu immersi akan mengarah pada meningkatnya jumlah kerak silika yang terlarut. Besarnya kerak silika yang terlarut maksimal terjadi pada kondisi rasio massa larutan-kerak sebesar 15:1 pada konsentrasi larutan HF sebesar 15% dengan waktu immersi selama 15 menit yaitu sebesar 21% dari total massa silika yang dilarutkan. Konsentrasi yang optimum pada pengasaman *scaling* silika diperoleh pada konsentrasi terbesar dalam

percobaan yaitu 15%. Konsentrasi ini dipilih karena pada konsentrasi tersebut asam HF mempunyai kemampuan melarutkan kerak terbesar yaitu 21% dan laju korosi yang dihasilkan dari penambahan asam masih dapat ditoleransi yaitu sebesar 0,647 mm/y sehingga material pipa mampu bertahan selama 4,63 tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- Barboux, P., Laghizil, A., Bessoles, Y., Deroulhac, H., dan Trouve, G. 2004. Paradoxical Crystalline Morphology of Frosted Glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, pp. 137–141.
- Gallup, D.L., 2011. pH Modification Scale Control Technology. *Proceedings International Workshop on Mineral Scaling*, Manila, Philippines, pp. 39-46.
- Genuino, H.C., Opembe, N.N., Njagi, E.C., McClain, S., dan Suib, S.L. 2012. A Review of Hydrofluoric Acid and Its Use in the Car Wash Industry. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18, pp. 1529-1539.
- Gunnarsson, I., dan Arnórsson, S. 2005. Impact of Silica Scaling on the Efficiency of Heat Extraction from High-Temperature Geothermal Fluids. *Journal of Geothermics*, 34, pp. 320-329.
- Inanli, M., dan Atilla, V. 2011. Metal Silicate Formation at Tuzla Geothermal Brine Lines. *Proceedings International Workshop on Mineral Scaling*, Manila, Philippines.
- Kashpura, V., dan Potapov, V. (2000). Study of the Amorphous Silica Scales Formation at the Mutnovskoe Hydrothermal Field (Russia). *Proceedings Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering* Stanford University, California.
- Mitra, A., dan Rimstidt, J.D. (2009). Solubility and Dissolution Rate of Silica in Acid Fluoride Solutions. *Journal of Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, pp. 7045–7059.
- Rogers, E., & Stovall, I. 2000. *Fundamentals of Chemistry: Solubility*. New York: Department of Chemistry. University of Wisconsin.
- Utami, W.S., Herdianita, N.R., dan Atmaja, R.W. 2014. The Effect of Temperature and pH on the Formation of Silica Scaling of Dieng Geothermal Field, Central Java, Indonesia. *Proceedings Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering* Stanford University, California.
- Wilson, N., Webster-Brown, J., dan Brown, K. 2007. Controls on Stibnite Precipitation at Two New Zealand Geothermal Power Stations. *Journal of Geothermics*, 4, pp. 330-347.
- Zarrouk, S.J., dan Moon, H. 2014. Efficiency of Geothermal Power Plants: a Worldwide Review. *Journal of Geothermics*, 51, pp. 142–153.
- Zarrouk, S.J., Woodhurst, B.C., dan Morris, C. 2014. Silica Scaling in Geothermal Heat Exchangers and Its Impact on Pressure Drop and Performance: Wairakei Binary Plant, New Zealand. *Journal of Geothermics*, 51, pp. 445–459.