

Kajian Terbentuknya *Scaling* pada Komponen Turbin Uap Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Skala Kecil

Assessment of Scaling Formation on the Steam Turbine Components of Small Scale Geothermal Power Plant

AMIRAL AZIZ*, KORNELIS K OLA

Balai Besar Teknologi Konversi Energi, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi
Gedung 625 Kluster Energi Puspiptek Serpong Tangerang Selatan
Email: amiralaziz58@gmail.com

ABSTRACT

Scaling and corrosion are two major problems in operation of the Small Scale Geothermal Power Plant. This paper discusses some results of the study that was conducted to assess the scaling formation in the Kamojang 3 MW Small Scale Geothermal Power Plant. The result of the study concluded that scaling occurred on the nozzle and steam turbine blade where the main minerals contained in sample A (solid) are Tridymate (SiO₂), Pyrite (FeS₂) and Chlorite (ClO₂). While in sample B (sand) where the main mineral contained in the sample is Tridymate (SiO₂), Pyrite (FeS₂), Plagioclase (Na,Ca)(Si, Al)4O₈ and Chlorite (ClO₂). The analysis of this scaling was done by XRD (X-Ray Diffraction) method. Scaling of the nozzle of the steam turbine causes the steam flow rate to decrease, thus lowering the power that the Small-Scale Geothermal Power Plant generates because the power generated by the Small-Scale Geothermal Power Plant is directly a function of the steam flow rate and the enthalpy difference between the inlet side and the outlet side of the turbine. However, scaling does not occur on the exit side of the wellhead KMJ 68 because the concentration of silica is very small that is 0.05 ppm at geothermal steam temperature 200.5°C.

Keywords: geothermal steam, scaling, corrosion, Small Scale Geothermal Power Plant

ABSTRAK

Scaling dan korosi merupakan dua masalah yang sangat serius ditemukan pada pengoperasian PLTP Skala Kecil. Tulisan ini membahas sebagian hasil studi yang dilakukan untuk mengkaji pembentukan scaling pada PLTP Skala Kecil Kamojang 3 MW dan pengaruhnya pada daya listrik yang dihasilkan oleh PLTP Skala Kecil. Dari hasil kajian dapat disimpulkan bahwa scaling terjadi pada Nozzle dan sudu-sudu turbin dimana mineral utama yang terdapat didalam sampel A (berupa endapan/padat) adalah Tridymate (SiO₂), Pyrite (FeS₂) dan Chlorite (ClO₂). Sedangkan pada sampel B (endapan lepas/pasiran) dimana mineral utama yang terdapat didalam sampel adalah Tridymate (SiO₂), Pyrite (FeS₂), Plagioclase (Na,Ca)(Si,Al)4O₈ dan Chlorite (ClO₂). Analisis scaling ini dilakukan dengan menggunakan metoda XRD.(X-Ray Diffraction). Scaling yang terjadi pada bagian nozzle dari turbin uap menyebabkan laju aliran uap berkurang sehingga menurunkan daya yang dihasilkan PLTP Skala Kecil karena daya yang dihasilkan PLTP Skala Kecil secara langsung merupakan fungsi dari laju aliran uap dan perbedaan entalpi antara sisi masuk dan sisi keluar dari turbin. Akan tetapi, tidak terjadi scaling pada sisi keluar kepala sumur KMJ 68 karena konsentrasi silika sangat kecil yaitu sebesar 0,05 ppm pada temperatur uap panas bumi 200,5°C .

Kata kunci : uap panas bumi, scaling, korosi, PLTP Skala Kecil,

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Panas (PLTP) skala kecil berkapasitas 3 MW dibangun BPPT di daerah Kamojang-Garut sejak tahun 2011⁽¹⁾ dan saat ini masih menjalani berbagai proses pengujian untuk mendapatkan karakteristik baik sistem maupun masing-masing peralatan yang digunakan.

Pada tahun 2017 dan 2018 kegiatan PLTP Skala Kecil adalah menguji turbin uap dikopel dengan generator sampai dengan putaran operasi 6.450 rpm. Pengujian dilakukan dengan *rolling* turbin uap dari putaran paling rendah 700 rpm, dilakukan selama kurang lebih satu jam sekaligus untuk memanaskan turbin uap agar tercapai temperatur yang merata pada turbin uap (*warming up*), untuk kemudian di naikan secara bertahap putaran turbin uap dengan menghindari

titik-titik putaran kritis sesuai dengan hasil *bump test*. Uji *rolling* ini dimaksudkan untuk menguji turbin uap beserta seluruh systemnya sampai dengan putaran operasi dan sekaligus masuk jaringan PLN^(2,3).

Dalam pengujian dan pengoperasian PLTP skala kecil *nozzle* dan *blades* dari turbin uap merupakan komponen penting dalam pembangkit listrik. Beberapa hasil penelitian telah menunjukkan bahwa *nozzle* dan *blade* tekanan rendah dari turbin uap umumnya ditemukan lebih rentan terhadap kegagalan dibandingkan dengan *blade* tekanan menengah dan tekanan tinggi. Mekanisme kegagalan yang paling umum yang terjadi dalam *blade* tekanan rendah dewasa ini biasanya yang berhubungan dengan getaran yang disebabkan oleh kondisi operasi, dan yang terjadi sebagai hasil dari ion korosif yang terbawa dan terakumulasi dalam fluida kerja dan diawali oleh pembentukan endapan (*scaling*) atau deposit pada *blade* serta komponen peredam atau *damping wire*.

Lingkungan geothermal memiliki karakteristik khusus yang membedakannya dengan lingkungan yang lain. Karakteristik tersebut adalah kondensat geothermal. Kondensat geothermal merupakan campuran dari air, gas dan unsur-unsur lain yang mengandung sejumlah energi yang cukup untuk menghasilkan daya dengan komposisinya yang unik, Hal ini dikarenakan karakteristiknya yang bersifat korosif dan atau *scaling* terhadap material.

Scaling didefinisikan sebagai pembentukan endapan atau kerak yang berasal dari mineral garam terlarut dalam air pada suatu media kontak tertentu. Salah satu penyebab terbentuknya *scaling* adalah adanya kandungan *silica* (SiO₂) yang terkandung dalam *brine*. Sifat-sifat yang mempengaruhi konsentrasi kelarutan *silica* dalam pembentukan *scaling* adalah temperatur, kadar garam (salinitas), dan nilai keasaman (pH). Ketika terjadi perubahan tekanan, temperatur, dan pH pada suatu sistem, keseimbangan ion-ion yang terkandung akan melebihi kelarutannya, sehingga terbentuk suatu endapan.

Penomena *scaling* dan korosi merupakan dua masalah yang sangat serius ditemukan pada pengoperasian PLTP skala kecil. Hal itu dapat terjadi pada reservoir, pipa produksi, peralatan-peralatan pembangkit seperti separator, turbin dsb. *Scaling* dan korosi sebagai kendala utama pengembangan PLTP di seluruh dunia⁽¹⁵⁾ Oleh sebab itu perlu dilakukan kajian tentang proses terjadinya *scaling*, pengaruhnya terhadap parameter kinerja PLTP serta langkah-langkah yang harus dilakukan untuk meminimumkan pengaruh terjadinya *scaling* pada PLTP skala kecil.

Tulisan ini menampilkan beberapa hasil studi pembentukan *scaling* pada sistem PLTP Skala Kecil Kamojang 3 MW dan pengaruhnya pada daya listrik yang dihasilkan oleh PLTP.

1.2. Tujuan Penelitian

Studi ini bertujuan untuk mengkaji pembentukan *scaling* pada sistem PLTP Skala Kecil Kamojang 3 MW dan pengaruhnya pada daya listrik yang dihasilkan oleh PLTP.

2. BAHAN DAN METODA

2.1. Diskripsi PLTP Skala Kecil 3 MW

Lokasi pembangkit berada di wilayah sekitar pengembangan sumur KMJ-68 dengan jarak dari sumur KMJ-68 ke pembangkit adalah sekitar 50 meter menuju arah barat daya, koordinat pembangkit secara geografis terletak pada 158° 43' 60" BT. Gambar 1 memperlihatkan situasi sumur Kamojang dan sumur reinjeksi. Air kondensat yang akan diinjeksikan adalah kurang lebih 20% dari jumlah uap yang masuk ke turbin dimana air ini disalurkan ke sumur KMJ-21 yang berlokasi kurang lebih 1.3 km sebelah barat laut dari pembangkit.

Fluida dari sumur KMJ 68 dialirkan kedalam separator dimana sebelumnya tekanan diturunkan dari tekanan pada kepala sumur 12 bar menjadi 6,5 bar di separator dengan menggunakan *pressure regulator valve*. Pada separator uap dan air dipisahkan, uap panas bumi kemudian sebagian besar diekspansikan melalui turbin dan sebagian dialirkan ke *steam ejector* dan *gland condenser*.



Gambar.1. Gambar situasi sumur Kamojang⁽¹⁾

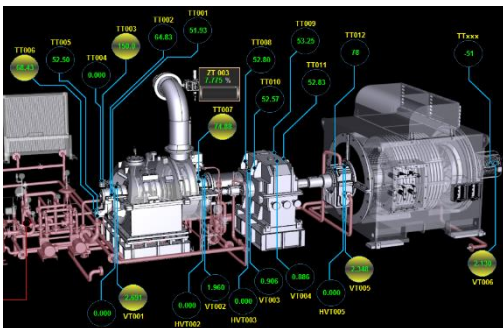
Setelah diekspansi di dalam turbin, uap dikondensasi oleh air pendingin di dalam kondensor, sementara NCG (*Non Condensing Gas*) tetap dalam kondisi gas.

PLTP dengan sistem kondensing terdiri dari sub-sistem berupa kelompok peralatan yang secara garis besar dapat dikelompokkan sebagai berikut^(2,3):

- a. *Turbine island* yang terdiri dari turbin uap, generator, *governor* dan peralatan pendukungnya seperti sistem pelumasan dan pendinginan baik untuk turbin dan

generator maupun sistem hidrolis untuk menggerakkan *governor*.

- Peralatan mekanikal rotating (*rotating equipment*) non-turbin yang terdiri dari pompa-pompa seperti *hot well pump*, *auxiliary pump*, *liquid ring vacuum pump* dan pompa atau kompresor lain yang menjadi bagian dari sistem pendukung seperti sistem gas bertekanan dan sistem pemadam kebakaran.
- Peralatan mekanikal stasioner yang terdiri dari separator/demister, kondensor utama, *steam jet ejector*, kondensor untuk *steam jet ejector*, dan *cooling tower*.
- Sistem pendukung seperti sistem udara bertekanan, sistem pemadam kebakaran, sistem re-injeksi air dan air penambah, dll.
- Sistem instrumentasi dan kontrol yang terdiri dari berbagai alat ukur, perangkat keras dan perangkat lunak pengendalian sistem untuk integrasi sistem pembangkit.
- Sistem elektrikal yang menyediakan daya listrik untuk peralatan dan gedung, mengendalikan dan mentransmisikan listrik yang dihasilkan, mengatur sistem daya cadangan jika terjadi kehilangan daya listrik ke PLTP.



Gambar 2. Sistem turbin generator PLTP Skala Kecil 3 MW^(2,3).

Gambar 2 memperlihatkan Sistem Turbine Generator PLTU Panas Bumi 3 MW. Konstruksi turbin uap PLTU Panas Bumi 3 MW berupa *solid shaft* dan drum (tanpa disk), dengan susunan sudu, dimana pada susunan blade terakhir akan ditahan dengan *blade locking* yang dikunci menggunakan "per".

Spesifikasi Turbin Uap adalah^(2,3):-

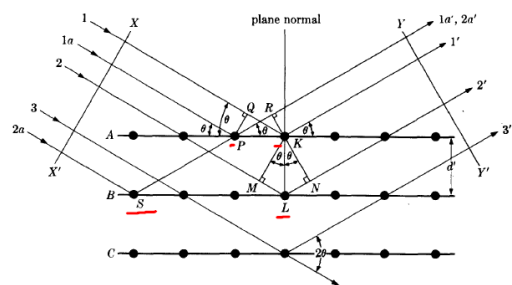
- Tekanan uap masuk : 6,50 bar
- Tekanan uap keluar : 0,33 bar
- Temperatur uap masuk: 165,0 °C
- Temperatur uap keluar : 72,6 °C
- Putaran operasi turbin : 6545 rpm
- Putaran generator : 1500 rpm
- Laju aliran uap : 8,6 kg/s

2.2. Metodologi

Terdapat dua titik pengambilan sampel seperti diperlihatkan pada Gambar 4. Untuk mendapat data karakteristik fluida panas bumi dari sumur KMJ 68 sampel fluida diambil pada titik setelah kepala sumur, sedangkan untuk menganalisis karakteristik endapan/*scaling* yang terbentuk didaerah turbin sampel diambil pada daerah blade turbin. Sampel fluida dan endapan dianalisis di laboratorium milik PGN Pertamina Kamojang. Metoda yang dipakai untuk mengetahui karakteristik endapan pada daerah turbin digunakan analisis XRD (*X-Ray Diffraction*).

Difraksi sinar-X adalah alat untuk menyelidiki struktur dari suatu material. Teknik ini berawal dalam penemuan Von Laue pada tahun 1912 tentang difraksi sinar-X kristal, cara difraksi untuk menunjukkan struktur kristal. Pada awalnya, difraksi sinar-X hanya digunakan untuk penentuan struktur kristal. Kemudian, kegunaan lain dikembangkan, dan sekarang metode ini diterapkan tidak hanya untuk penentuan struktur, tapi untuk masalah beragam seperti analisis kimia dan pengukuran tekanan, untuk mempelajari kesetimbangan fasa dan pengukuran ukuran partikel, untuk penentuan orientasi Kristal tunggal atau ensambel dari orientasi dalam agregat polikristalin⁽⁷⁾.

Terbentuknya suatu pola difraksi konstruktif hanya bisa terjadi apabila dua gelombang atau lebih mempunyai hubungan fasa tertentu. Jadi difraksi sinar-X yang akan ditinjau adalah berasal dari susunan atom-atom yang tersusun teratur secara periodik sesuai posisi tertentu di dalam kristal. Sehingga atom di dalam kristal dapat dipandang berada pada bidang yang sejajar satu sama lain yang dipisahkan oleh jarak d , seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.



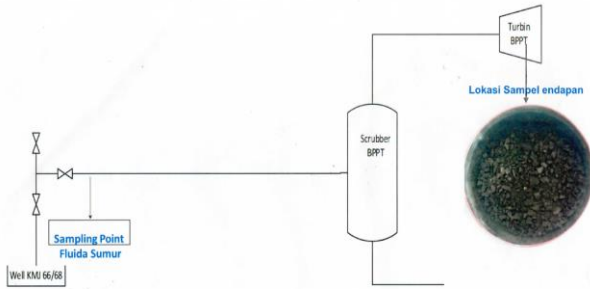
Gambar 3. Prinsip kerja metoda XRD

Berdasarkan Gambar 3, diasumsikan bahwa berkas sinar-X yang datang pada bahan sejajar satu sama lain, mempunyai hanya satu panjang gelombang (λ) dan dengan sudut datang dinyatakan dengan θ terhadap bidang difraksi (sudut *Bragg*). Besar sudut Bragg ini tentunya akan mempunyai harga berbeda untuk tiap-tiap bidang

Sehingga persamaan:

$$n \times \lambda = 2 \times d \times \sin \theta \dots \dots \dots (1)$$

terpenuhi, dan persamaan ini dikenal dengan Hukum Bragg. dan sudut θ dikenal sebagai sudut Bragg untuk penyinaran sinar-X oleh bidang-bidang atom hablur yang dipisahkan pada jarak d . dan $n = 1, 2, 3, \dots$. Prinsip inilah yang kemudian digunakan dalam mesin XRD atau *X Ray Diffractometer*



Gambar 4. Titik pengambilan sampel fluida dan endapan (*Scaling*)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada Tabel 1 dan Tabel 2 dapat dilihat hasil analisis komposisi kimia fluida (uap) panas bumi sumur KMJ 68 dan analisis sampel gas NCG KMJ 68. Fluida KMJ 68 mengandung diantaranya 22,1 ppm Hydrogen Sulfida (H_2S), 15,176 ppm Bicarbonat (HCO_3), 3,547 ppm Ammonium (NH_3), 0,962 ppm Baron (B) dan 0,05 Silica (SO_2). Dari analisis gas NCG, terdapat kandungan H_2S sebesar 2,82 mmol/kg *condensat* dan kandungan CO_2 sebesar 147,62 mmol/kg *condensat*.

Tabel.1. Analisis sampel fluida sumur KMJ 68

No	Parameter	Satuan	Nilai
1	Waktu pengambilan	menit	20
2	Electrical Conductivity	Mic/cm	11,8
3	pH/temp 25° C	-	4,659
4	TDS by calculation	ppm	1,174
5	Natrium (Na)	ppm	< 0,200
6	Kalium (K)	ppm	< 0,200
7	Calcium (Ca)	ppm	< 0,200
8	Magnesium (Mg)	ppm	< 0,100
9	Lithium (Li)	ppm	< 0,500
10	Ammonium (NH_3)	ppm	3,547
11	Besi (Fe)	ppm	0,003
12	Bicarbonat (HCO_3)	ppm	15,716
13	Clorida (Cl)	ppm	< 0,100
14	Sulphat (SO_4)	ppm	0,305
15	Hydrogen Sulfide (H_2S)	ppm	22,1

No	Parameter	Satuan	Nilai
16	Baron (B)	ppm	0,962
17	Silika (SiO_2)	ppm	0,05

Tabel.2. Analisis sampel gas (NCG) KMJ 68

No	Parameter	Satuan	Nilai
1	Waktu pengambilan	menit	20
2	CO_2	mmol/100 mol cond	292,35
3	H_2S	mmol/100 mol cond -	8,41
4	CO_2	mmol/kg cond	162,41
5	H_2S	mmol/kg cond	4,67
6	Gas Sisa	mmol/100 mol cond	6,18
7	Mol Ratio CO_2/H_2S		34,76
8	PCT Volume	%	0,31
9	PCT Berat	%	0,74
10	TKS	Kg/cm ²	17
11	Temperatur	°C	201,4

Gambar 5, 6, 7, dan 8 memperlihatkan terjadinya endapan (*scaling*) pada saluran uap (*steam piping*) dan turbin uap. Kandungan H_2S yang tinggi secara umum menimbulkan masalah metalurgi seperti korosi tegangan (*stress corrotion*), retak (*cracking*) dan kelelahan metal (*metal fatigue*).



Gambar 5. Endapan (*Scaling*) yang terjadi pada pipa uap PLTP Skala Kecil

Pada Gambar 6 dapat dilihat terjadinya korosi pada bagian pipa dari uap panas bumi. PLTP Kamojang 3 MW yang beroperasi dengan temperatur uap panas bumi pada sisi masuk turbin adalah 165°C, sedangkan kandungan CO_2 yang tinggi pada temperatur uap panas bumi dibawah 200°C akan mempercepat terbentuknya *calcite scaling* dan korosi aktif (*active corrotion*)⁽⁶⁾.



Gambar 6. Endapan (*Scaling*) dan korosi yang terjadi pada pipa uap PLTP Skala Kecil

Laju aliran korosi pada sebagian besar material akan meningkat apabila terjadi penurunan pH dari fluida panas bumi. Fluida panas bumi bertemperatur rendah mempunyai pH yang tinggi yaitu 8-10 sedangkan fluida panas bumi bertemperatur tinggi mempunyai pH 6-8, akan tetapi pH air yang ekstrim adalah 2 paling rendah dan 12 paling tinggi⁽⁹⁾. Pada Tabel 1 dapat dilihat bahwa pH fluida panas bumi Kamojang 68 adalah 4,659, pH yang rendah dapat menyebabkan terjadinya korosi pada pipa baja karbon dan dapat menyebabkan retak korosi pada pipa baja tahan karat⁽⁹⁾.

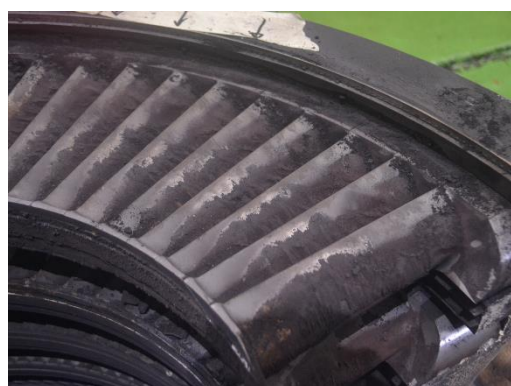


Gambar 7. Endapan (*Scaling*) pada turbin uap PLTP Skala Kecil

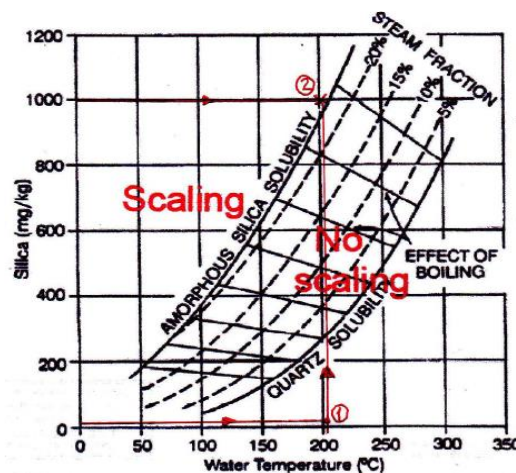
Berdasarkan Tabel 1 dapat dilihat bahwa kandungan silika (SiO_2) dalam uap panas bumi KMJ 68 adalah 0,05 ppm. Berdasarkan Gambar 9 dapat dilihat bahwa dengan menggunakan kurva Kosentrasi (Solubilitas) Silika di dalam air, pada titik 1 dimana kandungan SiO_2 sebesar 0,05 ppm dan temperatur $200,5^\circ\text{C}$, tidak terjadi *Silica Scaling* pada titik pada saluran uap di keluar kepala sumur. Untuk temperatur $200,5^\circ\text{C}$ *scaling* akan terjadi pada titik 2 apabila kandungan Silika sekitar 1000 ppm. Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa dengan berdasarkan kosentrasi Silika yang sangat kecil pada kondisi fluida *superheated* tidak memungkinkan terjadinya *scaling* disisi kepala

sumur KMJ 68. Dengan menjaga temperatur uap panas bumi diatas level kosentrasi dari *amorphous silica*, laju aliran *scaling* sangat rendah, oleh karena itu parameter ini adalah salah satu kriteria desain untuk merancang sebuah PLTP⁽¹⁶⁾.

Tejadi *scaling* pada komponen turbin seperti dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8. Ada dua macam endapan yang dianalisis yaitu sampel endapan pada turbin (sampel A) berupa butiran padat (Gambar 10) dan endapan pada turbin (sampel B) berupa material lepas pasiran (Gambar 11). Gambar 12 dan 13 memperlihatkan hasil analisis sampel endapan (*scaling*) pada komponen turbin dengan menggunakan metoda analisis XRD.(X-Ray Diffraction).



Gambar 8. Endapan (*Scaling*) pada turbin uap PLTP Skala Kecil



Gambar 9. Kosentrasi silika didalam air⁽¹⁶⁾

Pada Gambar 12 dapat dilihat kandungan senyawa/mineral pada endapan/padatan A dimana mineral utama yang terdapat didalam sampel adalah Tridymate (SiO_2), Pyrite (FeS_2) dan Chlorite (ClO_2). Sedangkat pada gambar 12 dapat dilihat kandungan senyawa/mineral pada endapan lepas/pasiran B dimana mineral utama yang terdapat didalam sampel adalah Tridymate

(SiO₂), Pyrite (FeS₂), Plagioclase (Na, Ca)(Si,Al)4O₈ dan Chlorite (ClO₂).



Gambar 10. Sampel A berupa butiran padat

Sebagian besar kerusakan (*damage*) pada komponen turbin (*nozzle* dan *blade*) biasanya berhubungan dengan karakteristik uap panas bumi. Apabila uap panas bumi bersih dan biasanya hanya terjadi erosi yang lambat (*slow erosive wear*). Permasalahan utama adalah terjadinya *scaling* pada daerah antara dimana terjadinya perbedaan tekanan yang tidak efektif karena adanya *misalignment*, distorsi atau ruang sisa yang berlebihan (*excessive clearances*).



Gambar 11. Sampel B berupa pasiran

Daya mekanik yang dihasilkan turbin uap dari PLTP Skala Kecil adalah perkalian laju aliran massa uap panas bumi dan perbedaan entalpi uap panas bumi antara sisi masuk turbin dan sisi keluar turbin. Sehingga daya listrik kotor yang dihasilkan generator PLTP Skala Kecil adalah^(4, 8):

$$P_{gross} = m_s \times (h_i - h_o) \times \eta_m \times \eta_g \dots\dots\dots(2)$$

Dimana:

P_{gross} = daya kotor yang dihasilkan generator (kW)

m_s = laju aliran uap panas bumi (kg/s)

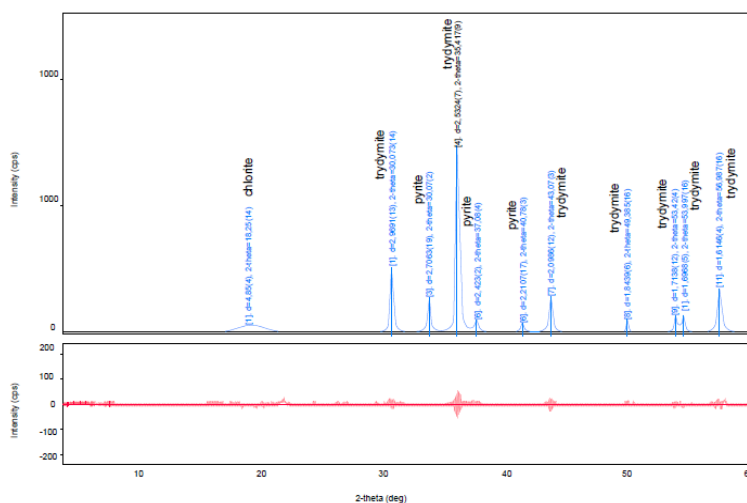
h_i = entalpi uap panas bumi pada sisi masuk turbin uap (kJ/kg).

h_o = entalpi uap panas bumi pada sisi keluar turbin uap (kJ/kg).

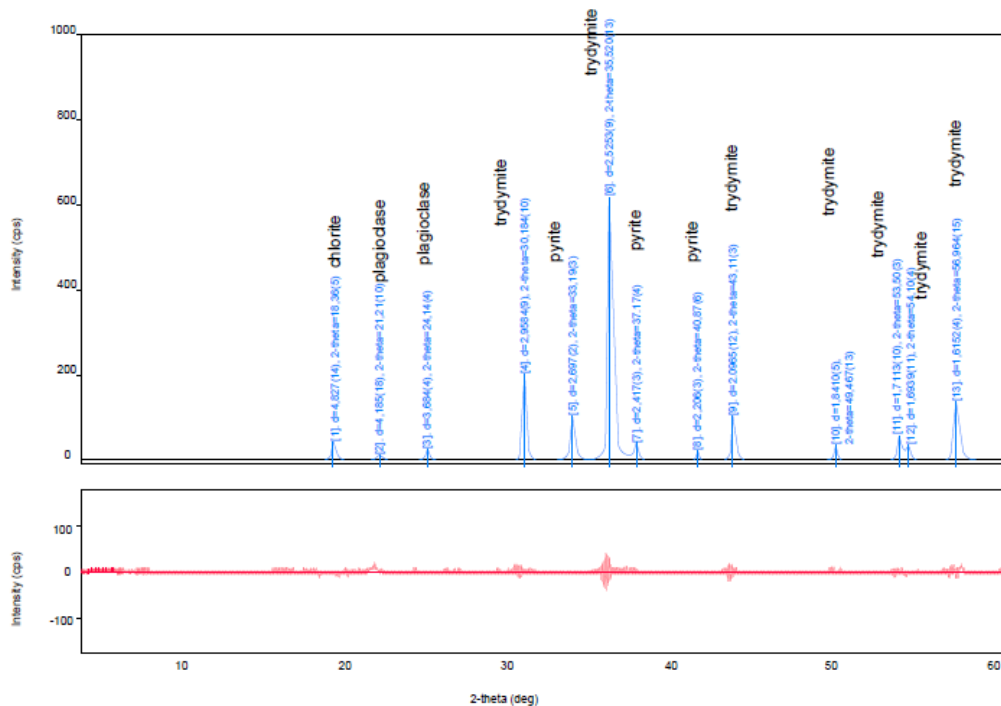
η_m = efisiensi mekanis

η_g = efisiensi generator

Berdasarkan Persamaan 2 diatas jelas bahwa laju aliran uap merupakan salah satu parameter besarnya daya yang dihasilkan PLTP Skala Kecil. Disposisi silika *scaling* pada sebagian besar terjadi pada bahagian *nozzle* turbin uap dan hanya sedikit terjadi pada *blade* tingkat pertama dari turbin. *Scaling* menyebabkan laju aliran uap berkurang sehingga menurunkan daya yang dihasilkan PLTP Skala Kecil karena daya yang dihasilkan PLTP Skala Kecil secara langsung merupakan fungsi dari laju aliran uap dan perbedaan entalpi antara sisi masuk dan sisi keluar dari turbin seperti dinyatakan oleh Persamaan 2 diatas.



Gambar 12. Grafik kandungan senyawa mineral pada endapan padat (Sampel A)



Gambar 13. Grafik kandungan senyawa mineral pada endapanLepas/ pasiran (Sampel B)

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian diatas dapat disimpulkan sebagai berikut :

- Berdasarkan analisis menggunakan XRD (X-Ray Diffraction), terjadi *scaling* pada sisi turbin dimana mineral utama yang terdapat didalam sampel A (berupa endapan/padat) adalah Tridymate (SiO_2), Pyrite (FeS_2) dan Chlorite (ClO_2). Sedangkan pada sampel B (endapan lepas/pasiran) dimana mineral utama yang terdapat didalam sampel adalah Tridymate (SiO_2), Pyrite (FeS_2), Plagioclase ($(\text{Na, Ca})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$) dan Chlorite (ClO_2).
- *Scaling* yang terjadi pada bagian *nozzle* dari turbin uap menyebabkan laju aliran uap berkurang sehingga menurunkan daya yang dihasilkan PLTP Skala Kecil karena daya yang dihasilkan PLTP Skala Kecil secara langsung merupakan fungsi dari laju aliran uap dan perbedaan entalpi antara sisi masuk dan sisi keluar dari turbin.
- Tidak terjadi *scaling* pada sisi keluar kepala sumur KMJ 68 karena konsentrasi Silika sangat kecil yaitu sebesar 0,05 ppm pada temperatur uap pans bumi 200,5°C.

DAFTAR PUSTAKA

1. Amiral, A. (2011). Analisis Eksergi PLTP Kamojang 68 Kapasitas 3 MW, Jurnal

Rekayasa Lingkungan, Vol No 2115-125, Pusat Teknologi Lingkungan – BPPT.

2. Amiral, A. (2016). Technical Documen - Laporan Supervisi Pengujian Peralatan Mekanikal PLTP 3 MW – PB 300, Program Pengembangan PLTP Skala Kecil, Balai Besar Teknologi Konversi Energi – BPPT.
3. Amiral, A. (2017). Technical Documen - Laporan Supervisi Pengujian Peralatan Mekanikal PLTP 3 MW – PB 300, Program Pengembangan PLTP Skala Kecil, Balai Besar Teknologi Konversi Energi – BPPT.
4. Black and Veath, Lawrance F. Drbal, Patricia G. B., Kayla L W. & R. Bruce E. (1996). *Power Plant Engineering, Chapman & Hall*, New York, p 38-95.
5. Buzianu, A. (2016). Some Analysis of Major Impact of Geothermal Fluid Components in Power Plant Equipment, International Conference in Innovative Research 2016 – IOP Conference Series – Material Science and Engineering.
6. Chris, M. & Alan, R. (2015). Geothermal Turbines – A Maintainer's Perspective, Proceeding World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.
7. Cullity, B. D. (1978). *Element of X-Ray Diffraction Second Edition*. Addition-Wesley Publishing Company, Inc. Philippines. p. III, 3, 82-84.

8. El Wakil, M. M. (1984). *Power Plant Technology*, Mc Graw - Hill Book Company, New York, p 499-529.
9. Gunnlaugsson E, Halldór, Á., Sverrir T. & Benedikt, S. (2014). *Problems in Geothermal Operation Scaling and Corrosion*, United Nation University – Geothermal Training Programme, El Salvador.
10. Gurnarson, I. & Arnórson, S. (2003), *Silica scaling: The main obstacle in efficient use of high-temperature geothermal fluids*. International Geothermal Conference, Reikjavick, S13 Paper 118, pp 30-36.
11. Grassiani, M. (2005). *Stainless Steel Corrosion in Geothermal Condensing Steam*. Stainless Steel, Conference, Maastrich, the Netherlands.
12. Muhammad, A. K. (2005). *Assessment of Scaling Formation in Steam Pipeline of Production Well KMJ 67 in Kamojang Geothermal Field West Java - Indonesia*, Report No 10, Geothermal Training Programme, The United Nation University, Reykjavík, Iceland.
13. Ocampo, J., Quintero, M., & Moya, A. (2005). *The silica scaling as a predominant factor of the production in Cerro Prieto geothermal wells*. Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey.
14. Otakar, J. & Lee, M. (2008), *Steam Turbine Corrosion and Deposit Problem and Solution*, Proceeding of the Thirty Seventh Turbo Machinery Symposium,
15. Stapleton, M. (2008). *Scaling and Corrosion in Geothermal Operation*, PowerChem Technology.
16. Sverrir, T. (2006). *Common Problems Faced in Geothermal Generation and How to deal with them Presented at Workshop for Decision Makers on Geothermal Projects in Central America*, organized by UNU-GTP and LaGeo in San Salvador, El Salvador.
17. Vetter, O.J & Kandarpa, V. (1982), *Handling of Scale in Geothermal Operation*, *International Conference on Geothermal Energy*, Florence, Paper E2