

## THE UTILIZATION OF BRINE AND CONDENSATE WASTE FOR SMALL UNIT POWER PLANTS

Mukhamad Nashir <sup>(1)</sup>, Yanuaris Dwi Cahyono <sup>(2)</sup>

Operasi Produksi PT. Pertamina Geothermal Energy

<sup>(1)</sup> Jalan Raya Tomohon No.420, Tomohon, Sulawesi Utara

<sup>(2)</sup> Menara Cakrawala Lantai 14, Jalan MH. Thamrin No.09 Jakarta Pusat

e-mail: <sup>(1)</sup> [mukhamad.nashir@pertamina.com](mailto:mukhamad.nashir@pertamina.com), <sup>(2)</sup> [yanuarisdwic@pertamina.com](mailto:yanuarisdwic@pertamina.com)

### ABSTRACT

After separation process in a separator, two phase geothermal fluids will produce steam and brine. Power plant will produce condensate as side products. Normally, the condensate is injected through reinjection wells in order to maintain sustainability of fluids in the reservoir. In certain case, brine and condensate temporarily are collected in cooling pond before pumped into reinjection wells.

If the flow rates of the brine and the condensate are high with relatively high of potential head too, the fluids contain significant energy that can be utilized using small unit power plant. Small unit power plant with brine can be used to generate one phase power that can be used as own use. This study was aimed to assess power potential that can be generated using brine and condensate at a field owned by PT. Pertamina Geothermal Energy. The assessment will be used for further small unit turbine design and power supply. The calculation and the analyses data from a geothermal field show the capacity of 5 KW using small unit turbine with Banki type and generator rotation of 1500 rpm.

### PENDAHULUAN

Saat ini, sektor industri menggunakan 44% dari total energi di Indonesia, sehingga efisiensi dan optimalisasi di sektor ini sangatlah penting dan berdampak besar bagi penghematan anggaran sampai citra perusahaan. Merupakan nilai tambah bagi suatu perusahaan apabila dia mampu mengelola penggunaa energi secara baik, terutama energi baru dan terbarukan.

Area Geothermal Lahendong merupakan salah satu lapangan panasbumi yang dimiliki dan dikelola oleh PT. Pertamina Geothermal Energy dengan kapasitas terpasang 4 x 20MW dengan 37 sumur yang terdiri dari sumur produksi, reinjeksi, dan monitoring.

Lapangan Lahendong merupakan lapangan dengan karakteristik dua fasa dengan komposisi air dan uap yang bervariasi. Dengan kondisi semacam itu, selain akan memproduksi uap, sumur-sumur di Lahendong juga akan menghasilkan produk sampingan berupa brine dan kondensat dengan jumlah yang cukup besar.

Di lapangan panasbumi Lahendong, sebagian besar brine yang dihasilkan di setiap Cluster dialirkan ke cooling pond Cluster 5 sebelum akhirnya diinjeksikan ke sumur-sumur reinjeksi di Cluster-7. Di setiap cooling pond, brine mengalir secara gravitasional dengan beda ketinggian sekitar 2-3 meter. Dengan kuantitas brine yang begitu besar disertai dengan tinggi curah yang cukup tinggi, maka dapat diprediksi bahwa kondisi ini memiliki potensi energi yang dapat ditingkatkan nilai gunanya.



Gambar 1: Kondisi Cooling Pond Cluster 5

### DASAR TEORI

#### Brine

Brine merupakan produk sampingan dari pemisahan fluida dua fasa. Setelah fluida dua fasa melewati separator, uap akan dialirkan menuju ke scrubber atau interface sedangkan brine selanjutnya akan

diinjeksikan ke bawah tanah untuk menjaga kesetimbangan reservoir. Sistem injeksi brine sendiri dapat dipakai menggunakan dua metode, metode injeksi panas dan metode injeksi dingin. Injeksi panas adalah injeksi brine langsung dari outlet separator menuju sumur reinjeksi. Pada injeksi panas, sumur-sumur produksi dan separator produksi biasanya ditempatkan pada elevasi yang lebih tinggi sehingga dapat memanfaatkan gaya gravitasi untuk transportasi brine. Pada metode injeksi dingin, brine dari separator ditampung terlebih dahulu di cooling pond sebelum akhirnya dipompakan ke sumur-sumur reinjeksi. Selama di cooling pond, brine akan mengalami penurunan temperatur yang diikuti oleh perubahan silica saturated index (SSI).

### **Debit Air dan Persamaan Kontinuitas**

Debit aliran adalah laju aliran air (dalam bentuk volume air) yang melewati suatu penampang melintang sungai per satuan waktu. Di dalam sistem satuan internasional (SI), debit memiliki satuan meter kubik per detik ( $m^3/s$ ).

Leonard Euler (1907-1783), menyatakan bahwa rapat massa dan kecepatan pada tiap titik dalam ruang berubah dengan waktu. Fluida sebagai medan rapat massa dan medan vektor kecepatan. Jika kecepatan ( $v$ ) dari tiap partikel fluida pada satu titik tertentu adalah tetap, dikatakan bahwa aliran tersebut bersifat tunak. Pada suatu titik tertentu tiap partikel fluida akan memiliki kecepatan ( $v$ ) yang sama, baik besar maupun arahnya. Pada titik lain suatu partikel mungkin sekali mempunyai kecepatan yang berbeda, akan tetapi tiap partikel lain pada waktu sampaititil teralhir mempunyai kecepatan sama seperti partikel yang pertama. Aliran seperti ini terjadi pada air yang pelan. Dalam aliran tidak tunak, kecepatan ( $v$ ) merupakan fungsi waktu. Secara empiris, persamaan debit aliran adalah sebagai berikut :

$$Q = A \cdot v \dots\dots\dots (a)$$

dimana,

$Q$  = debit aliran ( $m^3/s$ )

$A$  = luas area penampang ( $m^2$ )

$v$  = kecepatan aliran ( $m/s$ )

### **Tinggi Jatuh (Head)**

Head merupakan besaran yang menerangkan energi potensial yang dituliskan dengan ketinggian. Head diklasifikasikan menjadi 3, head bersih (head nett), head kotor (head gross), dan head kerugian (head loss). Head bersih adalah selisih antara head ketinggian kotor dengan head kerugian(head loss) di

dalam sistem pemipaan tersebut. Sedangkan yang dimaksud head kotor adalah jarak vertical antara permukaan air sumber dengan ketinggian air keluar saluran turbin (tail race) untuk turbin reaksi dan keluaran nosel untuk turbin impuls. Kerugian head (head loss) di dalam sistem pemipaan terdiri dari major head loss dan minor head loss. Major head loss berupa kekasaran pipa sedangkan minor head loss berupa kurugian-kerugian tekanan dari perlengkapan pemipaan seperti sambungan, katup, percabangan, diffuser dan sebagainya. Menurut Fox dan McDonald (1995) major head loss berbanding lurus dengan koefisien gesekan ( $f$ ), panjang pipa ( $L$ ), kuadrat kecepatan rata-rata dalam pipa ( $V_2$ ) dan berbanding terbalik dengan diameter dalam pipa ( $D$ ) dan kecepatan gravitasi ( $g$ ).

$$H_f = f \frac{L \cdot v^2}{D \cdot 2g} \dots\dots\dots (b)$$

Sedangkan minor head loss berbanding lurus dengan koefisien kerugian yang besarnya tergantung pada jenis kelengkapannya, kuadrat kecepatan rata-ratanya dan berbanding terbalik dengan percepatan gravitasi.

$$H_i = k \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (c)$$

dimana,

$H_f$  : Major head loss

$H_i$  : Minor head loss

$f$  : Koefisien gesekan

$L$  : Panjang pipa (m)

$v$  : Kecepatan rata-rata ( $m/s$ )

$D$  : Diameter dalam pipa (m)

$g$  : Percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

$k$  : Koefisien kerugian

### **Dasar Perhitungan Potensial Energi**

Potensi energi adalah nilai energi maksimum yang mungkin untuk dikembangkan atau dikonversikan menjadi bentuk energi lain. Dalam perancangan pembangkit listrik tenaga mikro hidro, potensi energi dapat didekati dengan persamaan yang dikembangkan oleh FITZ sebagai berikut :

$$P = H \cdot Q \cdot g \dots\dots\dots (d)$$

$$E = P \cdot t \dots\dots\dots (e)$$

dimana,

$P$  : Power (kW)

$H$  : Head Nett (m)

$Q$  : Debit (m<sup>3</sup>/s)

$E$  : Potensi energi

$t$  : Waktu (s)

### Energi Total dalam Aliran dan Hukum Bernoulli

$$E_T = \frac{m \cdot P}{\rho} + m \cdot h \cdot g + \frac{m \cdot v^2}{2}$$

apabila persamaan di atas dibagi dengan ( $m \cdot g$ ), maka didapatkan:

$$H_T = \frac{P}{g \cdot \rho} + h + \frac{v^2}{2g}$$

dimana  $\gamma$  = berat jenis fluida =  $\rho \cdot g$ , maka persamaan menjadi:

$$H_T = \frac{P}{\gamma} + h + \frac{v^2}{2g}$$

### Mekanisme Kerja Faktual Runner

Secara sederhana, mekanisme kerja faktual runner turbin banki dapat dijelaskan bahwa fluida akan mengalami kontak dengan sudu runner dalam empat posisi.

- Posisi 1. Fluida memasuki sudu dengan kecepatan mutlak sebesar  $v_1$ , kecepatan yang diberdayakan untuk memutar runner adalah kecepatan keliling  $u_1$ .
- Posisi 2. Fluida menjelang keluar dari sudu dengan kecepatan keliling  $u_2$  yang menambah kecepatan putar dari runner, dan kecepatan mutlak  $v_2$ , dan kecepatan relative  $w_2$  yang tegak lurus dengan jari-jari lingkaran runner ( $r$ ).
- Posisi 3. Fluida memasuki sudu dengan kecepatan relative  $w_3$  yang besarnya sama dengan  $w_2$ , kecepatan keliling yang mendukung putaran sudu  $u_3$  dan kecepatan mutlak  $v_3$ .
- Posisi 4. Fluida menjelang keluar dari sudu, dengan kecepatan mutlak  $v_4$  yang arahnya searah dengan gaya gravitasi, kecepatan keliling  $u_4$  dan kecepatan relative  $w_4$  yang besarnya sama dengan  $w_1$ .

### Energi Total dalam Aliran dan Hukum Bernoulli

Analisis kelayakan dalam perancangan turbin unit kecil biasanya dengan menghitung nilai-nilai NPV dan IRR. Net Present Value (NPV) adalah komponen benefit yang dihitung present value-nya berdasarkan discount rate/interest rate yang telah ditentukan.

Harga NPV diperoleh dari pengurangan present value komponen benefit dengan present value komponen cost. Harga NPV ini merupakan harga present value keuntungan atas investasi yang telah ditanamkan. Jika harga NPV ini mempunyai nilai negatif, maka ini menunjukkan bahwa pada tingkat discount rate yang dipilih akan lebih menguntungkan untuk menanamkan investasi di proyek lain daripada untuk pembiayaan proyek yang sedang ditinjau. Bila harga NPV ini mempunyai tanda positif, maka proyek yang sedang ditinjau dapat dikatakan sangat feasible secara finansial dan layak untuk dilanjutkan.

Economic Internal Rate of Return (EIRR) dapat dihitung dengan mencari nilai discount rate sehingga nilai present value benefit sama dengan nilai present value cost atau net present value-nya sama dengan nol. Jika hasil perhitungan EIRR lebih besar dari interest rate, maka dapat dikatakan investasi yang akan dilakukan layak untuk dilakukan. Apabila EIRR nilainya sama dengan interest rate, maka dapat dikatakan bahwa investasi yang ditanamkan akan balik modal. Sebaliknya, apabila EIRR memiliki nilai yang lebih kecil dari interest rate, maka investasi yang ditanamkan tidak layak.

## ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

### Data Perencanaan

Direncanakan, turbin unit kecil ini akan dirancang dengan memanfaatkan brine yang berlokasi di *cooling pond* Cluster-5 PT. Pertamina Geothermal Energy AG Lahendong. Di Cluster 5 terdapat lima sumur yakni sumur LHD-5 (produksi), LHD-23 (produksi), LHD-21 (re-injeksi), LHD-19 (re-injeksi), dan LHD-20 (re-injeksi). Dengan pertimbangan kondisi reservoir dan kemampuan sumur reinjeksi di Cluster-5, sebagian besar brine yang dihasilkan oleh sumur produksi di Cluster-5 dilimpahkan ke *cooling pond* Cluster-5. Di samping itu, *cooling pond* Cluster-5 juga menjadi titik kumpul dari brine yang dihasilkan oleh Cluster-4, Cluster-13, Cluster-24, dan kondensat dari PLTP Unit I, II, III, dan IV. Secara lebih rinci, total produksi brine yang disalurkan ke *cooling pond* Cluster-5 adalah sebagai berikut :

Tabel 1: Produksi Brine dan Kondensat Area Lahendong

Suplai Air		Debit (ton/jam)
TOTAL		844,6
Sumber :		
	Brine LHD-5	95
	Brine LHD-23	236
	Kondensat PLTP III & IV	75
	Brine dari cluster 13	20,88
	Brine dari cluster 24	225,72
	Brine dari cluster 4	117
	Kondensat PLTP I & II	75

### Potensi Energi Curah di Cooling Pond Cluster-5

Dari data TFT (Tracer Flow Test), jumlah total brine yang terkumpul di cooling pond Cluster 5 adalah :

$$Q = 844.6 \text{ ton/jam}$$

$$Q = 0.236 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 2.365 \text{ liter/s}$$

Sedangkan head statis teramati di lokasi transfer cooling pond yakni 3 m dan nilai percepatan gravitasi 9,81 sehingga potensi energi teoritis maksimum dari brine di transfer cooling pond yang mungkin dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik skala kecil sebesar :

$$P = H \cdot Q \cdot g$$

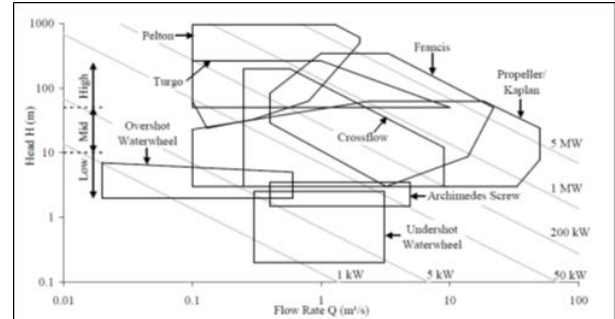
$$P = 6898 \text{ Watt}$$

$$P = 6,898 \text{ kW}$$

Effisiensi pembangkitan yang direkomendasikan adalah 80%, maka power terbangkitkan di poros turbin akan sebesar **5,51 kW**. Dengan memakai efisiensi generator adalah 90%, maka energi listrik yang dapat dimanfaatkan adalah sekitar **4,97 kW**.

### Pemilihan Tipe Turbin

Pada perancangan turbin unit kecil, pemilihan tipe turbin harus dilakukan secara tepat karena akan sangat berpengaruh terhadap optimasi pembangkitan dan biaya secara keseluruhan. Lokasi dengan head yang tinggi dan debit yang relative lebih kecil akan lebih cocok jika dipakai turbin unit kecil dengan tipe impuls, sedangkan lokasi dengan head yang kecil akan tetapi memiliki debit air yang relative lebih besar, maka lebih cocok jika dipakai dengan turbin bertepe reaksi.



Gambar 2: Kurva Pemilihan Tipe Turbin (Sumber : Williamson)

Apabila diplotkan flow rate di Cluster-5 ( $0,236 \text{ m}^3/\text{s}$ ) dan head (3 m) ke kurva di atas, maka tipe turbin yang paling tepat untuk di-install di cooling pond Cluster 5 yakni turbin tipe cross flow.

### Parameter Rancangan Turbin

#### Persamaan-persamaan untuk segitiga kecepatan

Segitiga kecepatan merupakan salah satu cara untuk menggambarkan kecepatan keluar dan masuknya fluida di turbin. Kecepatan absolute brine yang memasuki runner turbin dapat dihitung melalui persamaan :

$$C_1 = k \sqrt{2 g H}$$

Mockmore et al (1949) dan Dieztl (1993) mengemukakan bahwa koefisien dependent (k) dari nosel untuk turbin banki memiliki kisaran nilai 80-95, sehingga dalam perancangan ini dipakai nilai koefisien dependent = 0,95. Oleh karena itu,

$$C_1 = 0,95 \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 3}$$

$$C_1 = 7,28 \text{ m/s}$$

#### Kecepatan angular runner

Untuk turbin banki, diameter luar runner dapat dihitung apabila kita telah menetapkan putaran generator yang akan dipakai dan perbandingan kecepatan. Direncanakan generator yang akan dipasang akan memiliki putaran 1500 rpm dan perbandingan kecepatan 6 : 1. Sehingga kecepatan angular di runner ( $\omega$ ) :

$$\omega = \frac{\text{putaran generator}}{\text{perbandingan kecepatan}}$$

$$\omega = \frac{1500}{6}$$

$$\omega = 250 \text{ rpm}$$

$$\omega = 4,167 \text{ rps}$$

### Diameter Luar Runner

Efisiensi turbin dapat diprediksikan dengan menggunakan persamaan berikut ini :

$$HP_{out} = \frac{\gamma Q U_1 \cdot V_1 \cos \alpha_1 \cdot (1 + \frac{\psi \cos \beta_2}{\cos \beta_1})}{g}$$

$$HP_{in} = \frac{\gamma Q \cdot V_1^2}{C^2 2 g}$$

$$Eff = \frac{HP_{out}}{HP_{in}}$$

Untuk efisiensi maksimum,

$$U_1 = 0,5 C_1 \cos \alpha_1$$

Banki merekomendasikan kecepatan tangensial ( $U_1$ ) optimum pada  $\alpha_1 = 22^\circ$ .

Sehingga, kecepatan tangensial runner ( $U_1$ ) didapatkan sebesar 3,375 m/s.

Sedangkan kecepatan tangensial ( $U_1$ ) adalah hasil dari perkalian antara jari-jari luar runner ( $r_1$ ) dengan kecepatan angular ( $\omega$ ), maka :

$$D_1 = 2 \left( \frac{U_1}{\omega} \right)$$

$$D_1 = 1,12 \text{ meter}$$

### Panjang Runner Turbin

Panjang runner turbin ditentukan melalui metode banki dengan persamaan sebagai berikut :

$$LD = 2,627 \frac{Q}{(\sqrt{H})}$$

maka dari persamaan di atas, didapatkan panjang runner turbin adalah 0,21 m.

### Diameter dalam runner

Aziz dan Desai (1991) merekomendasikan perbandingan diameter dalam dan luar turbin adalah 0,7 sehingga diameter dalam runner =  $0,74 \times 1,12 \text{ m} = 0,83 \text{ m}$ .

### Ketebalan jet air ( $S_0$ )

Rekomendasi dari banki, ketebalan jet adalah 0,2 dari diameter luar runner.

$$S_0 = 0,2 \cdot 0,83$$

$$S_0 = 0,22 \text{ m}$$

$$S_0 = 22 \text{ cm}$$

### Spasi sudu, jumlah sudu, dan radius kurva sudu

Spasi sudu dapat ditentukan melalui persamaan :

$$S_1 = k D_1$$

$$S_1 = 0,087 \cdot 1,12$$

$$S_1 = 0,1 \text{ m}$$

Spasi blade =  $t = S_1 / \sin \beta_1 = 0,81 \text{ m}$ .

Prosedur matematis yang ditawarkan oleh banki untuk menentukan jumlah sudu paling optimum dituliskan sebagai berikut :

$$n = \frac{\pi D_1}{t}$$

$$n = \frac{3,14 \cdot 1,12}{0,81}$$

$$n = 29$$

Radius sudu didektati dengan  $0,32 r_1$  ( $\rho = 0,32 r_1$ ) sehingga didapatkan radius sudu yang direkomendasikan adalah 18 cm.

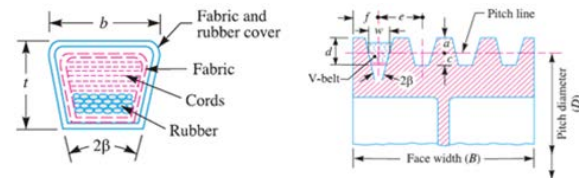
### Transmisi Tenaga

Dengan pertimbangan keamanan dan harga, transmisi tenaga dalam perancangan pembangkit listrik unit kecil ini akan memakai sistem pulley dan v-belts. Di atas sudah diterangkan bahwa perbandingan kecepatan angular runner dengan generator adalah 1:6. Maka, apabila potensial power yang mungkin terbangkitkan oleh turbin adalah sebesar 4,97 kW, maka poros harus dirancang untuk mampu menerima tenaga sebesar :

$$\text{Tenaga rancang} = 4,97 \times 1,22 \times 1,3$$

$$\text{Tenaga rancang} = 7,887 \text{ kW}$$

Pemilihan tipe v-belt dan v-grooved pulley adalah mengacu pada IS : 2494 – 1974, seusai tabel berikut ini :



Gambar 3: Penampang V-Belt dan Pulley (Sumber : Khurmi dan Gupta)

Tabel 2 : Pemilihan Ukuran V-Belt dan Pulley (Sumber : Khurmi dan Gupta)

Type of belt	Power ranges in kW	Minimum pitch diameter of pulley (D) mm	Top width (b) mm	Thickness (t) mm	Weight per metre length in newton
A	0.7 – 3.5	75	13	8	1.06
B	2 – 15	125	17	11	1.89
C	7.5 – 75	200	22	14	3.43
D	20 – 150	355	32	19	5.96
E	30 – 350	500	38	23	–

Type of belt	w	d	a	c	f	e	No. of sheave grooves (n)	Groove angle (2β) in degrees
A	11	12	3.3	8.7	10	15	6	32, 34, 38
B	14	15	4.2	10.8	12.5	19	9	32, 34, 38
C	19	20	5.7	14.3	17	25.5	14	34, 36, 38
D	27	28	8.1	19.9	24	37	14	34, 36, 38
E	32	33	9.6	23.4	29	44.5	20	–

Note : Face width (B) = (n – 1) e + 2 f



Dari IS : 2494 - 1974, maka tipe belt dan pulley yang paling cocok untuk dipilih adalah tipe C, dengan minimum pitch diameter dari pulley sebesar 200 mm. Diameter pulley yang lebih besar ditentukan dari speed ratio (1 : 6), maka diameter pulley besar = 1200 mm dengan jarak pusat ke pusat pulley (C) yakni sebesar 1400 mm. Panjang belt ditentukan dari persamaan :

$$\text{Panjang belt} = 2C + \pi (D+d)/2 + (D-d)^2/4C$$

$$\text{Panjang belt} = 2800 + 2198 + 178 = 5,176 \text{ meter.}$$

### Perancangan Poros

Suatu poros transmisi dapat mengalami beban puntir, beban lentur, atau kombinasi dari keduanya. Faktor kelelahan, tumbukan atau pengaruh konsentrasi tegangan bila diameter poros diperkecil (poros bertangga) atau bila poros mempunyai alur pasak, harus diperhitungkan. Sebuah poros harus direncanakan sehingga cukup kuat untuk menahan beban. Pada perancangan turbin unit kecil, beban terjadi biasanya karena berat turbin, berat poros itu sendiri ataupun beban turunan dari putaran wheel. Adapun persamaan-persamaan yang dipakai dalam perancangan poros :

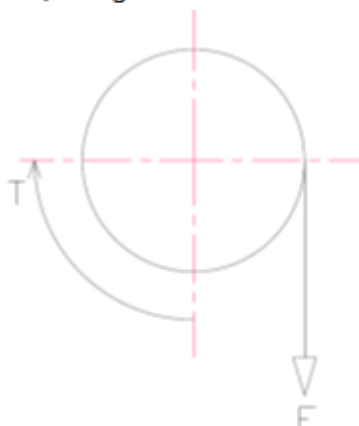
#### *Torsi yang bekerja pada runner*

Torsi merupakan ukuran energi yang diwujudkan sebagai tenaga puntiran. Torsi merupakan gaya yang berkerja pada suatu poros silinder dengan jari-jari r. Pada perancangan ini, diameter poros belum diketahui sehingga torsi yang terjadi akan didekati dengan dugaan power yang akan dibangkitkan.

$$T = \frac{P}{746} \cdot \frac{6300}{\omega}$$

$$T = 44,40 \text{ Nm}$$

$$T = 4531,023 \text{ kg.mm}$$



Gambar 4: Ilustrasi Hubungan antara Gaya Tangensial dan Torsi

### *Tegangan geser izin ( $\tau_a$ )*

Tegangan geser yang diizinkan ( $\tau_a$ ) untuk pemakaian umum pada poros dapat diperoleh dengan berbagai cara.  $\tau_a$  dihitung atas dasar batas kelelahan puntir yang besarnya diambil 50% dari batas kelelahan tarik dan besarnya kira-kira 45% dari kekuatan tarik ( $\tau_B$ ). Jadi batas kelelahan puntir adalah 18% kekuatan tarik ( $\tau_B$ ) sesuai standar ASME. Tegangan geser poros yang diizinkan ( $\tau_a$ ) diketahui dengan persamaan :

$$\tau_a = \frac{\sigma_B}{Sf_1 \cdot Sf_2}$$

dimana,

$\tau_a$  = tegangan geser poros yang diizinkan (kg/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_B$  = kekuatan tarik (kg/mm<sup>2</sup>)

$Sf_1$  &  $Sf_2$  = faktor keamanan

Bahan poros yang akan digunakan yakni S35C-D, dengan nilai kekuatan tarik ( $\sigma_B$ ) sebesar 60 kg/mm<sup>2</sup>. Dengan memakai angka keamanan 1,5 dan 2,0 maka tegangan geser yang diizinkan ( $\tau_a$ ) adalah :

$$\tau_a = \frac{60}{(1,5) \cdot (2)}$$

$$\tau_a = 20 \text{ kg/mm}^2$$

### *Perhitungan diameter poros*

$$D_p = \left\{ \left( \frac{5.1}{\tau_a} \right) \cdot K_t \cdot C_b \cdot T \right\}^{\frac{1}{3}}$$

dimana,

$C_b$  = Faktor kelenturan

$K_t$  = Faktor koreksi untuk momen puntir

$T$  = Momen puntir rencana (kg.mm)

Dalam perancangan ini, potensi terjadinya beban puntiran dan lendutan tergolong sangat kecil, sehingga dipakai  $K_t = 3$  dan  $C_b = 4$ .

Maka, diameter poros yang direncanakan akan sebesar :

$$D_p = \left\{ \left( \frac{5.1}{20} \right) \cdot (3) \cdot (4) \cdot 4532 \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$D_p = 24.02 \text{ mm diambil } D_p = 25 \text{ mm}$$

### Sistem Proteksi Tegangan

Salah satu permasalahan yang sering dijumpai dalam pengoperasian pembangkitan listrik unit kecil adalah tidak adanya jaminan pasokan air dengan jumlah yang konstan. Hal tersebut akan berimbas pada putaran generator menjadi tidak konstan sehingga frekuensi generator juga tidak konstan. Andaikata

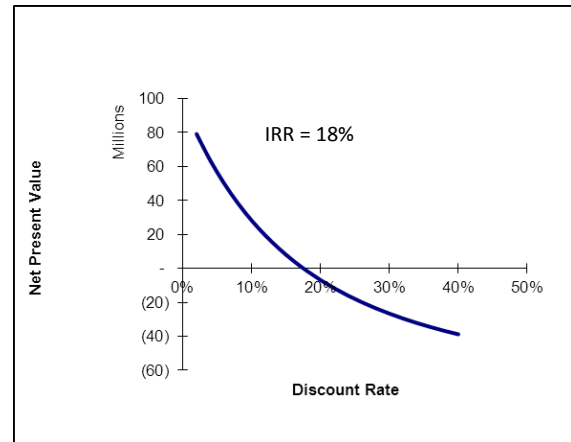
daya pasok air ke turbin dijamin selalu tetap, maka frekuensi dan respon generator akan menjadi fungsi dari beban (load). Agar frekuensi yang dihasilkan dari generator besarnya selalu konstan, maka nilai beban dari generator juga harus konstan. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem tiruan yang mana sistem tersebut memiliki kemampuan untuk dilakukan pengaturan beban. sistem tiruan ini dikenal dengan beban komplemen.

Effendy M (2009) mengemukakan bahwa pada suatu kondisi beban tertentu (misal pada beban sebesar 75% beban penuh), daya air yang masuk ke turbin diatur sehingga diperoleh putaran generator yang dikehendaki. Jika pada beban konsumen terjadi penurunan beban sebesar  $\Delta I$ , maka beban komplemen akan dilewati arus yang rata-ratanya akan sebesar penurunan arus akibat turunnya beban konsumen ( $\Delta I$ ). Dengan demikian generator akan dibebani dengan total beban yang selalu konstan.

Oleh karena daya yang masuk ke turbin dibuat tetap dan beban yang dirasakan oleh generator juga selalu tetap, maka putaran generator senantiasa juga tetap. Dengan kata lain, jika debit air konstan maka generator harus dibebani dengan daya konstan agar putaran generator selalu tetap. Oleh karena beban konsumen tidak selalu konstan, maka untuk menjaga kestabilan putaran turbin generator diperlukan beban komplemen yang besarnya diatur oleh ELC sedemikian rupa sehingga kapasitas nominal generator akan tersetting secara konstan.

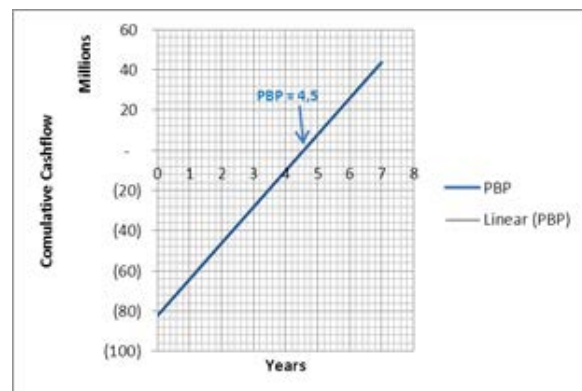
### **Kajian Kelayakan Finansial**

Maksud dari analisis kelayakan pasar adalah memberikan gambaran bahwa produk yang akan dirancang memiliki kelayakan ekonomis. Pada perancangan turbin unit kecil Cluster-5, biaya terhitung untuk satu set unit kecil 5 kW lengkap dengan jasa pemasangannya terhitung sebesar Rp. 82,162,500.00. Sementara itu, dengan memakai harga beli listrik industri sebesar Rp. 915,00 per kWh dan pembangkitan 4,14 kW, maka penghematan per tahun apabila pembangkit listrik unit kecil dioperasikan adalah sebesar Rp. 17,968,195.65. Dengan demikian dapat dihitung NPV bernilai positif pada tahun operasi ke enam dan IRR sebesar 18%. Dengan hasil perhitungan tersebut, maka proyek pembangunan pembangkit listrik unit kecil ini secara finansial layak untuk dikembangkan.



*Gambar 4 :Grafik NPV dan IRR*

Payback period dalam proyek pembangunan pembangkit listrik ini dapat dihitung dengan mengetahui cashflow kumulatif dari setiap tahunnya. Dari perhitungan dapat diketahui bahwa keseluruhan biaya investasi yang akan dikeluarkan akan terlunasi dalam jangka waktu 4,5 tahun operasional.



*Gambar 5 : Grafik Payback Period*

### **DISKUSI DAN KESIMPULAN**

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan bahwa brine yang dihasilkan oleh sumur-sumur produksi di area geothermal memiliki potensi untuk dikembangkan menjadi pembangkit listrik skala kecil. Dari perhitungan potensi energi di cooling pond Cluster-5 Area Lahendong menunjukkan bahwa terdapat potensi energi sekitar 5 kW yang dapat dimanfaatkan dengan pemasangan turbin unit kecil. Selain itu, dari hasil kajian kelayakan proyek, perancangan dan pembangunan pembangkit listrik unit kecil di Cluster-5 Area Lahendong sangat layak untuk dilakukan dengan NPV bernilai positif pada tahun operasional ke-5 dan IRR 18%.

Namun demikian, perlu dilakukan kajian yang lebih detail dan komprehensif baik dari sisi analisis teknis, data maupun lingkungan sehingga pembangunan pembangkit listrik unit kecil ini bisa dilaksanakan sesuai dengan rencana dan target perusahaan. Ke depan, tidak menutup kemungkinan pembangkit listrik unit kecil ini bisa diaplikasikan ke area geothermal lain.

## **REFERENSI**

- Effendy M. 2009. "Desain Kontrol Beban Elektronik pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro." *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik* Vol. 12, No.2, 176-185, November 2009
- Gordon, J.L. 2003. *Turbine Selection for Small Low-Head Hydro Developments*. Water Power XIII. New York – USA
- Khurmi R.S, Gupta J.K. 2005. "A Text Book of Machine Design." Eurasia Publishing House (PVT.) LTD. Ram Nagar-New Delhi-110 05
- Larasakti A, Himran S, Arifin AS. 2012. "Pembuatan dan Pengujian Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Turbin Bangki Daya 200 Watt." *Jurnal Mekanikal* Vol. 3 No.1: Januari 2012:245-253
- Sinaga, Jofri B. 2009. "Perancangan Turbin Air untuk Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (Studi Kasus Desa Way Gison Kecamatan Sekincau Kabupaten Lampung Barat)." *Jurnal Sains dan Inovasi* 5 (1) 57-64 (2009)
- Sudargana, Karnoto, Nugroho H. 2005. Studi Kelayakan dan Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Dukuh Pekuluran Kec, Doro Kab. Pekalongan. *Rotasi*-Volume 7 Nomor 2 April 2005
- Tiriono, M. 2012. "Pemodelan Turbin Cross-Flow untuk Diaplikasikan pada Sumber Air Dengan Tinggi Jatuh dan Debit Kecil. *Jurnal Neutrino* Vol. 4, No. 2 April 2012.
- Tracer Flow Test Lahendong September 2012. Thermocam-PT.Pertamina Geothermal Energy. *tidak diterbitkan*
- Williamson SJ, Stark BH, Booker JD. 2011. "Low Head Pico Hydro Turbine Selection using a Multi-Criteria Analysis."
- Zia O, Ghani OA, Wasif ST, Hamid Z. 2010. "Design, Fabrication and Installation of A Micro-Hydro Power Plant." Faculty of Mechanical Engineering GIK Institute of Engineering Sciences & Technology

## **LAMPIRAN** **Computer Aided Design Runner**

