

## ESTIMASI POTENSI CADANGAN ENERGI PANAS BUMI LAPANGAN Z MENGGUNAKAN SIMULASI *STOCHASTIC MONTE CARLO*

Rezta Indayani<sup>1</sup>, Diah Rosiani<sup>1\*</sup>, Verona Cycilia Rymoza<sup>1</sup>, Trilis Setyo Rahayu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Teknik Produksi Migas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Cepu, Blora, 58315

\*E-mail: diyahrosiani@gmail.com

### ABSTRAK

Pengestimasian cadangan *geothermal* diperlukan untuk memaksimalkan eksploitasi sumber energi panas bumi sebagai alternatif sumber daya terbarukan yang ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan khusus untuk menerapkan metode volumetrik, panas di tempat, guna memperkirakan kapasitas produksi energi listrik dari reservoir panas bumi yang didominasi oleh air. Penelitian ini menggunakan simulasi *Monte Carlo* untuk mengestimasikan cadangan panas bumi dengan bantuan pustaka stokastik berbasis *Python* yang berguna untuk menjalankan simulasi tersebut. Dalam hal ini, pustaka stokastik *Geothermal Power Potential Evaluation (GPPEval)* terdiri dari tiga modul utama: modul pembangkit listrik panas bumi, modul simulasi *Monte Carlo*, dan modul alat bantu. Penelitian ini menggunakan data sumber air panas dari lapangan panas bumi Z untuk menunjukkan penerapan *GPPEval* dalam mengevaluasi potensi energi panas bumi. Hasil distribusi frekuensi dari simulasi stokastik mengindikasikan bahwa wilayah ini pada awalnya mampu mendukung pembangkit listrik sebesar 93,2 MWe selama 30 tahun, dengan potensi peningkatan hingga 101 MWe. Penelitian lanjutan akan dilakukan untuk memvalidasi potensi energi panas bumi berdasarkan data terbaru.

**Kata kunci:** Cadangan Panas Bumi, Simulasi *Monte Carlo*, *GPPEval*, Metode Volumetrik

### 1. PENDAHULUAN

Lapangan panas bumi Z terletak di Nusa Tenggara Timur, Indonesia, dan merupakan salah satu sumber energi *geothermal* yang menjanjikan di pulau Flores. Dengan potensi yang signifikan untuk pengembangan, lapangan Z telah mulai beroperasi sejak tahun 2011 dengan kapasitas awal 10 MW dari empat unit pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) yang ada[1]. Sejak saat itu, lapangan ini telah menyuplai listrik ke beberapa desa dan kota di sekitarnya yang menunjukkan keberhasilan awal dalam memanfaatkan sumber daya *geothermal* untuk memenuhi kebutuhan energi lokal.

Pembangunan PLTP ini dimulai dengan pengeboran sumur pertama pada tahun 2003, diikuti oleh sumur kedua dan ketiga pada tahun 2006. Dengan suhu reservoir yang berkisar antara 230°C hingga 250°C, lapangan ini juga termasuk dalam sistem *geothermal* dua fase yang memiliki potensi untuk menghasilkan energi lebih besar. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa lapangan Z dapat menghasilkan daya hingga 40 MW dengan pengembangan lebih lanjut pada unit-unit baru.

Dalam konteks pengembangan energi terbarukan, *geothermal* menawarkan keunggulan dibandingkan sumber energi lainnya. Menurut Nurwahyudin dan Harmoko, *geothermal* dapat menghasilkan energi secara stabil tanpa dipengaruhi oleh cuaca atau musim, menjadikannya pilihan yang menarik untuk memenuhi kebutuhan energi lokal [1]. Penelitian lebih lanjut oleh Gunawan et al. juga menyoroti bahwa pengembangan sumber daya *geothermal* dapat membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meningkatkan keberlanjutan lingkungan[2].

Untuk memastikan keberlanjutan dan efisiensi pengembangan ini, penting untuk melakukan estimasi potensi cadangan *geothermal* secara akurat. Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Hamidah tahun 2021 menggunakan metode simulasi *Monte Carlo* dan analisis volumetrik untuk memperkirakan cadangan energi di lapangan Z. Hasil studi tersebut memberikan estimasi potensi cadangan dengan nilai P10 sebesar 53.35 MWe, P50 sebesar 76.58 MWe, dan P90 sebesar 103.87 MWe [3].

Melanjutkan penelitian ini, dilakukan analisis lebih mendalam mengenai karakteristik reservoir lapangan Z dan potensi cadangannya dengan menggunakan metode volumetrik *Monte Carlo* dengan bantuan *Python*. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang potensi sumber daya *geothermal* di lapangan Z serta mendukung pengembangan energi terbarukan di Indonesia.

Penelitian ini menggunakan metode volumetrik untuk memperkirakan kemampuan produksi energi listrik dari reservoir dominan air, dan untuk mengembangkan *library stochastic* berbasis *Python* yang disebut *Geothermal Power Potensial Evaluation (GPPEval)* dengan metode yang sesuai untuk menjalankan simulasi. *GPPEval* terdiri dari modul pembangkit listrik tenaga panas bumi, modul simulasi *Monte Carlo*, dan modul alat. Perhitungan energi panas bumi didasarkan pada berbagai parameter reservoir yang dilakukan menggunakan simulasi *stochastic Monte Carlo*, dan menerapkan metode probabilistik untuk mengevaluasi cadangan atau sumber daya dan ketidakpastian estimasinya.

## 2. METODE

### 1. Perhitungan *Thermal Energy*

Metode volumetrik mengacu pada perhitungan energi panas di dalam batuan dan fluida yang dapat diekstraksi berdasarkan volume reservoir yang ditentukan, suhu reservoir, dan suhu referensi atau akhir. Metode diterapkan oleh USGS untuk Penilaian Sumber Daya Panas Bumi Amerika Serikat [4]. Dalam memperkirakan potensi energi *geothermal*, perlu dilakukan perhitungan *thermal energy* yang mempertimbangkan beberapa atribut khusus dari area penelitian, termasuk akuifer atau reservoir panas bumi, *cap rock*, *bedrock*, baik *fractured rock* atau *permeable rock*. Persamaan yang digunakan dalam menghitung energi panas untuk reservoir yang didominasi air diberikan pada persamaan (1), (2) dan (3) [5].

Total energi termal dalam reservoir dihitung dengan menggabungkan panas yang tersimpan dalam batuan dan fluida:

$$Q_t = Q_r + Q_w \quad (1)$$

Panas dalam batuan dihitung menggunakan rumus:

$$Q_r = A \times h \times [\rho_r \times C_r (1 - \phi)(T_i - T_f)] \quad (2)$$

Panas dalam fluida dihitung dengan mempertimbangkan energi internal cairan dan uap:

$$Q_w = A \times h \times [\rho_w \times C_w (1 - \phi)(T_i - T_f)] \quad (3)$$

Secara teori, apabila reservoir memiliki zona dua fase merujuk pada perbandingan yang dilakukan oleh Sanyal dan Sarmiento menunjukkan bahwa jika hanya air yang diproduksi dari reservoir maka 3,9 persen panas yang terkandung dalam fluida; sedangkan jika hanya uap yang diproduksi maka 9,6 persen panas yang terkandung dalam fluida. Jika air dan uap keduanya diproduksi dari reservoir, kandungan panas dalam fluida berada di antara 3,9% dan 9,6%. Kesimpulannya, semua panas sebenarnya tersimpan dalam batuan dan tidak perlu membedakan panas yang tersimpan dalam air dan uap secara terpisah. Pendekatan ini dijelaskan dengan serangkaian persamaan berikut untuk menghitung komponen cairan dan uap secara terpisah dalam reservoir [5].

$$Q_t = Q_r + Q_s + Q_w \quad (4)$$

Dimana:

$$Q_r = A \times h \times [\rho_r \times C_r (1 - \phi)(T_i - T_f)] \quad (5)$$

$$Q_s = A \times h \times [\rho_{si} \times \phi(1 - S_w)(H_{si} - H_{wf})] \quad (6)$$

$$Q_w = A \times h \times [\rho_{wi} \times \phi(1 - S_w)(H_{wi} - H_{wf})] \quad (7)$$

Untuk menilai pembangkit listrik reservoir, area panas bumi harus memiliki parameter yang ditentukan seperti luas reservoir (A), ketebalan (h), dan suhu ( $T_r$ ), *abandonment temperature* ( $T_a$ ), porositas batuan rata-rata ( $\phi$ ), *rock specific heat* (Cr) dan *density* ( $\rho_r$ ), *water specific heat* (Cf) dan *density* ( $\rho_f$ ), *recovery factor* (RF), *electrical conversion efficiency* ( $\eta_e$ ), *plant net capacity factor* (PF) dan *lifespan* (t) [6]. Dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut.

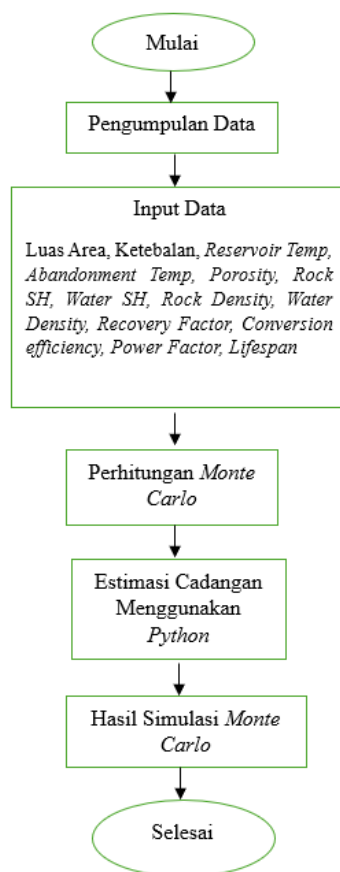
$$P = \frac{Q_t \times R_f \times C_e}{P_f \times t} \quad (8)$$

## 2. Simulasi Stochastic Monte Carlo

Metode *Monte Carlo* adalah kelas algoritma komputasi yang luas, yang bergantung pada pengambilan sampel acak berulang untuk memperoleh hasil numerik [7]. Simulasi *Monte Carlo* digunakan untuk menghasilkan distribusi probabilitas suatu variabel yang bergantung pada parameter lain. Diciptakan oleh John Neumann dan Stanislaw Ulam (1940) sebagai alat pengambilan keputusan dalam kondisi *uncertain*, simulasi ini melakukan analisis risiko dengan membangun model yang memungkinkan dengan mengganti rentang nilai yang memiliki ketidakpastian. Kemudian, simulasi ini menghitung hasil secara berulang-ulang menggunakan nilai acak yang berbeda dari fungsi probabilitas hingga menghasilkan distribusi nilai yang memungkinkan. Dalam konteks panas bumi, aplikasi metode ini dilakukan dengan menggunakan distribusi probabilitas parameter potensi secara acak sebagai input untuk menghasilkan kurva distribusi probabilitas dan tingkat kepercayaan dalam perhitungan potensi [3]. Pada dasarnya, hal ini dapat dilakukan dengan *software* yang berlisensi, namun dalam kasus ini algoritma simulasi stokastik *Monte Carlo* diprogram menggunakan *Python* karena kesederhanaannya sebagai kode *pseudo-natural*; algoritma bekerja baik secara lokal (mandiri) maupun dalam aplikasi berbasis *web*; bersifat *open source* dan gratis, sehingga dapat digunakan, disalin, dimodifikasi, digabungkan, diterbitkan, dan didistribusikan oleh siapa pun; *Python Library* dapat digunakan di hampir semua sistem operasi yang tersedia (seperti *Linux*, *Microsoft Windows*, *MacOS*); dan *stochastic library* yang dikembangkan dapat didistribusikan tanpa biaya.

Metode stokastik seperti *Monte Carlo*, memungkinkan untuk mengestimasi dengan lebih baik tentang reservoir energi panas bumi dan memprediksi *performance* reservoir di masa depan. Dengan demikian, kita dapat membuat keputusan yang lebih strategis dalam pengembangan sumber daya ini. Selain itu, penggunaan *Python* sebagai alat analisis data juga memungkinkan untuk melakukan simulasi yang kompleks dengan efisiensi tinggi.

Data sifat reservoir dari lapangan panas bumi Z digunakan untuk menunjukkan bagaimana *GPPEval* dapat digunakan untuk menilai potensi tenaga panas bumi. Dalam konteks ini, penggunaan metode stokastik dengan *Python* menjadi sangat relevan karena dapat memberikan analisis yang lebih akurat dan detail tentang sumber daya panas bumi.



**Gambar 1. Diagram Alir Estimasi Cadangan Potensi Energi Panas Bumi Menggunakan Simulasi Monte Carlo**

Langkah-langkah untuk menjalankan simulasi *Monte Carlo* dan memproses hasilnya menggunakan *python* dimulai dengan melakukan instalasi *Anaconda Navigator* dan *GPPeval*, langkah pertama adalah mengimpor *GPPeval* sebagai alat yang digunakan untuk menjalankan simulasi *Monte Carlo*. Setelah itu, masukkan semua parameter yang diperlukan untuk simulasi. Kemudian, jalankan simulasi *Monte Carlo* untuk mendapatkan hasil yang diinginkan. Setelah simulasi selesai, plot hasilnya dalam bentuk histogram untuk melihat distribusi frekuensi dan kurva estimasi kepadatan empiris. Terakhir, plot juga hasil simulasi dalam bentuk distribusi frekuensi kumulatif untuk analisis lebih lanjut. Detail alur estimasi cadangan panas bumi dengan menggunakan simulasi *Monte Carlo* dapat dilihat pada Gambar 1.

### 3. PEMBAHASAN

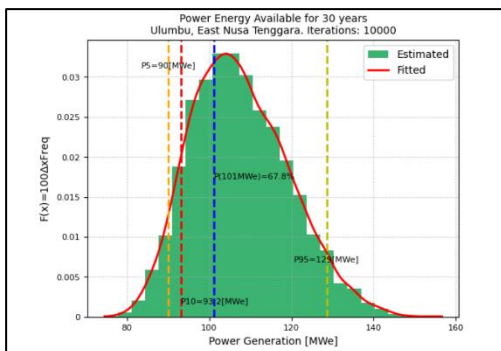
Lapangan *geothermal Z* merupakan sistem dominan air dengan kedalaman puncak reservoir yang diperkirakan terletak pada elevasi 200 hingga 600 m, sedangkan batuan penyusun reservoir termasuk dalam fasies proksimal – medial yang dominan tersusun oleh piroklastik, lava dan sebagai sedimen sebagai basement. Temperatur reservoir sebesar 230-250°C.

Parameter pertama yang harus dilihat dalam mengevaluasi potensi energi panas bumi adalah mengetahui total *thermal energy*. Tabel 1 merupakan data input untuk menghitung *power potential* yang dikumpulkan dari berbagai literatur.

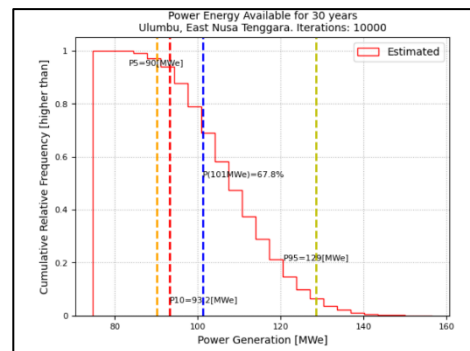
**Tabel 1. Parameter termodinamika reservoir untuk menghitung total energi panas Lapangan Z**

Parameter	Min	Most Likely	Max	Distribusi	Sumber
Luas Area, $A$ (km <sup>2</sup> )	10	10.5	10.5	Triangular	[8]
Ketebalan, $h$ (m)	1300	1500	2000	Triangular	[8]
Reservoir Temp, ( $^{\circ}C$ )	230	240	250	Triangular	[9]
Abandonment Temp, ( $^{\circ}C$ )	100	150	180	Triangular	[3]
Porosity, $\phi$	0.05	0.1	0.2	Triangular	[3]
Rock SH, $C_r$ (kJ/kg $^{\circ}C$ )	0.8	0.85	0.95	Triangular	[8]
Water SH, $C_f$ (kJ/kg $^{\circ}C$ )	4	4.18	4.5	Triangular	[8]
Rock Density, $\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	2400	2450	2600	Triangular	[3]
Water Density, $\rho_r$ (kg/m <sup>3</sup> )	800	1000	1200	Triangular	[3]
Recovery Factor, $RF$	0.2	0.25	0.26	Triangular	[4]
Conversion Efficiency, $\eta_e$	0.109	0.112	0.114	Triangular	[10]
Power Factor, $PF$	0.8	0.85	1	Triangular	[10]
Lifespan, $t$ (years)		30		Triangular	[11]

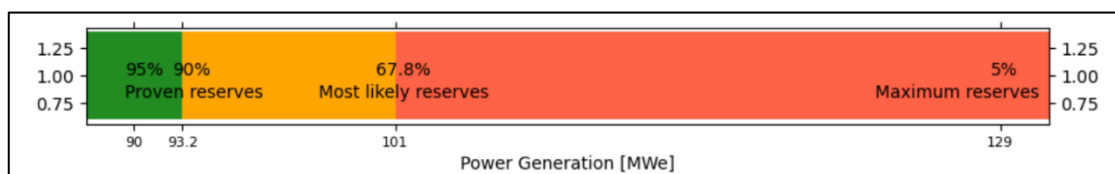
Selanjutnya hasil simulasi menunjukkan cadangan energi panas bumi, umumnya diklasifikasikan menjadi tiga kategori: *proven*, *probable*, dan *possible*. Klasifikasi ini bertujuan untuk memberikan kejelasan dalam estimasi cadangan yang bisa diekstraksi dari reservoir *geothermal*. Dalam penelitian Sanyal dan Sarmiento, P90 untuk *proven reserve* didefinisikan sebagai cadangan yang memiliki probabilitas 90% , P50 untuk *proven + probable reserve* dan P10 untuk *proven + probable + possible reserve*. Karena distribusi hasil *Monte Carlo* seringkali sangat tidak simetris, nilai *proven + probable reserve* lebih baik direpresentasikan [5]. Representasi linier data mata air panas dari medan panas bumi lapangan Z diberikan pada Gambar 4. Simulasi ini dijalankan selama 30 tahun.



**Gambar 2. Distribusi Frekuensi**



**Gambar 3. Distribusi Frekuensi Kumulatif**



**Gambar 4. Representasi linier data mata air panas lapangan Z selama 30 tahun**

Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4 menunjukkan bahwa ketika potensi lebih besar atau sama dengan 93,2 MWe, probabilitasnya mencapai 90% (yaitu *proven reserve*), dan ketika potensi lebih besar atau sama dengan 101 MWe, probabilitasnya adalah 67,8% (yaitu *proven + possible reserve*). Selain itu, kemungkinan bahwa potensi lebih besar atau sama dengan 101 MWe hanya 5% (yaitu *proven + probable + possible maximum reserves*). Setelah itu, perkiraan awal potensi daya adalah 8,8 MWe/km<sup>2</sup> selama maksimal 30 tahun.

Hasil ini menunjukkan bahwa lapangan panas bumi ini dapat mendukung pembangkit listrik berkapasitas 93,2 MWe selama maksimal 30 tahun, dengan kemungkinan ekspansi hingga 101 MWe, tergantung pada pengeboran lanjutan dan ketersediaan data kinerja lapangan. Risiko bahwa lapangan tidak dapat mempertahankan kapasitas 93,2 MWe diperkirakan sama dengan atau kurang dari 10%, dan hal ini dapat dipastikan. Selain itu, telah diamati bahwa volume reservoir (yaitu luas area dan ketebalan) memiliki pengaruh langsung terhadap potensi panas bumi. Namun, hasil yang ditunjukkan dalam penelitian ini berbeda dengan penelitian Hamidah tahun 2021 karena adanya data yang lebih mutakhir dan akurat mengenai kondisi lapangan panas bumi. Data baru ini mencakup informasi yang lebih rinci mengenai volume reservoir, termasuk luas area dan ketebalan yang memiliki pengaruh signifikan terhadap potensi panas bumi, serta adanya pemutakhiran data kinerja lapangan dan hasil pengeboran lanjutan memungkinkan perhitungan kapasitas dan potensi ekspansi yang lebih tepat, sehingga menghasilkan proyeksi yang lebih optimis dibandingkan penelitian sebelumnya.

#### 4. SIMPULAN

Studi ini menggunakan metode volumetrik dan simulasi *Monte Carlo* berbasis *Python* untuk memperkirakan potensi energi listrik dari reservoir panas bumi. *Stochastic library* yang dikembangkan, *GPPeval*, mampu menghitung dan memvisualisasikan kapasitas listrik, menunjukkan bahwa lapangan panas bumi lapangan Z berpotensi mendukung pembangkit listrik 93,2 MWe selama 30 tahun dengan kemungkinan ekspansi hingga 101 MWe.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Nasution, Y. Yunis, and M. Afif, "The Ulumbu Geothermal Development West Flores, Eastern Indonesia," *11th Asian Geotherm. Symp.*, p. 18, 2016.
- [2] R. B. Astro, "Overview of the Potential and Utilization of Geothermal Energy on Flores Island," *J. Penelit. Pendidik. IPA*, vol. 9, no. 12, pp. 1377–1384, 2023.
- [3] A. T. Hamidah, "Perbandingan Perhitungan Metode Pengkajian Potensi Panas Bumi antara Volumetrik dan Mass-in-place (MIP) dengan Simulasi Monte Carlo: Studi Kasus Lapangan Panas Bumi Ulumbu," 2021.
- [4] L. P. . Muffler and H. W. Menard, "Assessment of geothermal resources of the United States-1978; U.S. Geological Survey Circular 790," *U.S. Geol. Surv. Circ. 790*, vol. 2, p. 163, 1979.
- [5] Z. F. Sarmiento, B. Steingrímsson, and G. Axelsson, "Volumetric resource assessment," *Short Course V Concept. Model. Geotherm. Syst.*, pp. 1–15, 2013.
- [6] P. Carlos, F. Yasuhiro, C. Fidel, H. Rubén, and E. Salvador, "A Python-based Stochastic Library for Assessing Geothermal Power Potential in the Municipality of Nombre de Jesús , El Salvador," *Proceedings World Geothermal Congress 2020.*, p. 8, 2021.
- [7] N. Puji Gumati, "Noviandhini Puji Gumati, 2013 Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu," *Apl. Metod. Monte Carlo Pada Penentuan Harga Opsi Amerika*, p. 25, 2013.
- [8] R. T. Yuono and Y. Daud, "Reservoir simulation of Ulumbu geothermal field using TOUGH2 and ITOUGH2 simulator," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 538, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/538/1/012059.
- [9] Direktorat Panas Bumi, Direktorat Jenderal EBTKE Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan

- Panas Bumi, Badan Geologi, "Potensi Panas Bumi Indonesia Jilid 2", Direktorat Panas Bumi., vol 2 , 2017.
- [10] M. Parini and K. Riedel, "Combining probabilistic volumetric and numerical simulation approaches to improve estimates of geothermal resource capacity," *Proc. World Geotherm. Congr. 2000*, pp. 2785–2790, 2000.
- [11] Badan Standarisasi Nasional, "Parameter dalam estimasi potensi energi panas bumi," *SNI 6482.*, 2018.

#### Daftar Simbol

Qt	= Total energi <i>thermal</i> (kJ);
Qr	= Heat in rock (kJ);
Qs	= Heat in steam (kJ);
Qw	= Heat in water (kJ);
A	= Area of the reservoir (m <sup>2</sup> );
h	= Average thickness of the reservoir (m);
Cr	= Specific heat of rock at reservoir condition (kJ/kg <sup>o</sup> K);
Cl	= Specific heat of liquid at reservoir condition (kJ/kg <sup>o</sup> K);
Cs	= Specific heat of steam at reservoir condition (kJ/kg <sup>o</sup> K).
Ø	= Porosity;
Ti	= Average temperature of the reservoir (°C);
Tf	= Final or abandonment temperature (°C);
Sw	= Water saturation;
psi	= Steam density at reservoir temperature (kg/m <sup>3</sup> );
pwi	= Water density at reservoir temperature (kg/m <sup>3</sup> );
Hwf	= Final water enthalpy at abandonment temperature (kJ/kg);
Hsi, Hwi	= Steam and water enthalpies at reservoir temperature (kJ/kg).
P	= Power potential (MWe);
Rf	= Recovery factor;
Ce	= Conversion efficiency;
Pf	= Plant factor;
t	= Time in years.