

PERKIRAAN ULANG CADANGAN MUNGKIN PANAS BUMI TEMPERATUR MENENGAH
DI INDONESIA*MEDIUM TEMPERATURE GEOTHERMAL POSSIBLE RESERVE REASSESSMENT
IN INDONESIA*

Husin Setia Nugraha, Rina Wahyuningsih, dan Tony Rahadinata
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
husin.nugraha@esdm.go.id

ABSTRAK

Informasi tentang nilai dan karakteristik sumber daya dan cadangan energi panas bumi yang akurat dibutuhkan dalam perencanaan kebijakan energi yang tepat dalam rangka optimalisasi pemanfaatan sumber daya panas bumi di Indonesia. Selain itu, perbedaan hasil perhitungan sumber daya dan/atau cadangan energi panas bumi yang dilakukan pengembang dan pemerintah menyebabkan perhitungan keekonomian proyek pengembangan panas bumi suatu area prospek juga berbeda. Studi ini melakukan perhitungan ulang sumber daya panas bumi kategori temperatur menengah kelas cadangan mungkin dengan mengganti asumsi beberapa parameter dengan asumsi parameter *best practice* yang digunakan dalam beberapa literatur. Kelima parameter tersebut yaitu perhitungan termal yang terkandung dalam fluida, temperatur akhir, saturasi air, faktor konversi listrik dan faktor kapasitas pembangkit. Hasil perhitungan ulang pada studi ini menghasilkan nilai sumber daya panas bumi yang berbeda dari hasil perhitungan Badan Geologi. Persentase perbedaan perhitungan Badan Geologi dan studi ini terdapat indikasi korelasi kuat dengan temperatur reservoir ditunjukkan dengan nilai R^2 sebesar 85%. Korelasi yang kuat ini mengindikasikan adanya perbedaan yang sistematis, yang diduga karena dalam perhitungan Badan Geologi diasumsikan adanya perubahan fasa air dari fasa cair (*liquid*) ke fasa uap (*vapor*). Hasil perhitungan ulang dengan menggunakan persamaan korelasi tersebut dengan *input* temperatur reservoir menghasilkan pengurangan nilai sumber daya panas bumi sebesar 27% atau sebesar 940 MW_e dari hasil perhitungan Badan Geologi. Hal tersebut mengakibatkan nilai sumber daya temperatur menengah kelas cadangan mungkin yang sebelumnya mencapai 3.482 MW_e berkurang menjadi total 2.541 MW_e.

Kata kunci: perhitungan sumber daya panas bumi, metode volumetrik perhitungan energi panas bumi, karakteristik sumber daya panas bumi temperatur menengah

ABSTRACT

Accurate information about the value and characteristics of geothermal energy resources and reserves is needed in planning appropriate energy policies to optimize the utilization of geothermal resources in Indonesia. In addition, differences in the results of calculating geothermal energy resources and/or reserves by developers and the government cause the economic calculations of geothermal development projects in particular prospect area to also be different. This study performs a recalculation of geothermal medium temperature resources category by replacing the assumptions of several parameters with the assumptions of best practice parameters used in several literatures. The five parameters are thermal calculations contained in the fluid, final reservoir temperature, water saturation, electricity conversion factor and generating capacity factor. The results of this recalculation resulted in a geothermal resource value that was different from the results of the Geological Agency's calculations. The percentage difference between the calculations of the Geological Agency and this study

indicates a strong correlation with reservoir temperature as shown by the R^2 value of 85%. This strong correlation indicates that there is a systematic difference, which is suspected because in the Geology Agency's calculations it is assumed that there is a change in the water phase from the liquid phase to the vapor phase. The results of recalculation using the correlation equation with the reservoir temperature as an input resulted in the value of geothermal resources reduction by 27% or 940 MWe from the results of the Geological Agency's calculations. The recalculation result of medium temperature geothermal resources which previously reached 3,482 MWe reduced to a total of 2,541 MWe.

Keywords: geothermal resources calculation, volumetric method for geothermal energy calculation, medium temperature geothermal resources characteristics

PENDAHULUAN

Metode penentuan sumber daya panas bumi berdasarkan parameter input yang digunakan dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu metode berdasarkan data pada penentuan berdasarkan satu titik waktu (*single point*) dan berdasarkan sejarah (*historical*). Metode berdasarkan satu titik waktu tidak memerlukan data-data sejarah produksi sebagai parameter input perhitungan, contoh metodenya adalah perhitungan *Heat Flux*, *Planar Fracture*, *Magmatic Heat Budget*, *Total Well Flow*, *Volumetric*, *Mass-in-Place*, dan *Power Density*. Sedangkan metode *historical* artinya metode yang menggunakan data dan informasi sejarah produksi lapangan sebagai parameter input. Metode yang termasuk jenis ini antara lain *Decline Analysis*, *Lumped-Parameter* dan Simulasi Reservoir Numerik (Ciriaco et al., 2020).

Sampai saat ini, untuk metode volumetrik, ada 3 (tiga) jenis pendekatan yang dapat digunakan yaitu metode *United States Geological Survey* (USGS) untuk menghitung energi termal pada batuan, metode USGS untuk menghitung energi termal pada batuan dan fluida; dan metode *the Australian Geothermal Reporting Code Committee* (AGRCC) untuk menghitung energi termal pada batuan dan fluida (Ciriaco et al., 2020).

Di Indonesia, penentuan sumber daya dan/atau cadangan panas bumi berdasarkan pada beberapa Standard Nasional Indonesia (SNI) yang sudah ditetapkan. Ada tiga SNI yang bisa jadi

acuan penentuan sumber daya dan/atau cadangan panas bumi ini, yaitu SNI 6169:2018 tentang metode estimasi potensi energi panas bumi, SNI 6482:2018 tentang parameter dalam estimasi potensi energi panas bumi, dan SNI 6009:2017 tentang klasifikasi sumber daya dan cadangan energi panas bumi Indonesia (Badan Standardisasi, 2017, 2018a, 2018b).

Dua SNI merupakan SNI revisi dari SNI yang telah ditetapkan sebelumnya. SNI 6169:2018 tentang metode estimasi potensi energi panas bumi merupakan revisi SNI 13-6171-1999 dengan judul yang sama. Sedangkan SNI 6482:2018 tentang parameter dalam estimasi potensi energi panas bumi adalah revisi SNI 13-6482-2000 tentang angka parameter dalam estimasi potensi energi panas bumi (Badan Standardisasi, 1999, 2000).

Metode volumetrik dan simulasi reservoir numerik merupakan metode yang paling banyak digunakan untuk perhitungan sumber daya panas bumi. Metode volumetrik ini merupakan metode yang paling banyak digunakan pada tahap sebelum adanya pengeboran sumur karena kemudahan dan akurasi dibandingkan metode-metode lain. Sedangkan pada tahap sesudah dilakukan pengeboran sumur, simulasi reservoir numerik lebih banyak digunakan karena memberikan data dan informasi yang lebih akurat dan terpercaya (Ciriaco et al., 2020).

Namun, di luar kemudahannya dalam penggunaannya, metode volumetrik ini juga memiliki ketidakpastian yang cukup

tinggi terutama dalam hal penentuan dimensi reservoir dan proporsi jumlah energi panas yang dapat dimanfaatkan (Ciriaco et al., 2020). Hal ini akan menyangkut ketidakpastian parameter-parameter yang dijadikan input dalam perhitungan. Ketidakpastian nilai input parameter untuk metode ini dapat dikurangi dengan menerapkan pendekatan perhitungan probabilistik menggunakan simulasi monte carlo.

Di Indonesia, ketidakpastian penggunaan metode volumetrik ini semakin bertambah besar untuk penentuan sumber daya panas bumi kategori temperatur menengah. Hal ini dikarenakan SNI yang telah ditetapkan merupakan hasil analisis data dan informasi berdasarkan karakterisasi sumber daya panas bumi kategori temperatur tinggi. Sampai saat ini di Indonesia, belum ada sumber daya panas bumi kategori temperatur menengah yang telah berproduksi.

Dalam Badan Standardisasi (1999, 2000, 2017, 2018a, 2018b) dijelaskan bahwa sumber daya panas bumi dibedakan menjadi tiga kategori sumber daya berdasarkan perkiraan temperatur reservoir. Reservoir dengan temperatur di atas dengan 225°C diklasifikasikan sebagai sumber daya panas bumi kategori temperatur tinggi, untuk reservoir dengan temperatur di bawah atau sama dengan 125°C digolongkan kepada sebagai sumber daya panas bumi kategori temperatur rendah, sedangkan reservoir dengan temperatur di antara kedua interval temperatur tadi dikategorikan sebagai sumber daya panas bumi menengah. Di Indonesia, sumber daya temperatur tinggi dan menengah diasumsikan sebagai sumber daya energi panas bumi yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik.

Berdasarkan studi yang dilakukan Direktorat Panas Bumi (2014) dinyatakan bahwa dari 269 titik sumber daya panas bumi yang teridentifikasi dan tersedia datanya pada tahun 2014, sebanyak 36% di antaranya termasuk sumber daya

kategori temperatur tinggi, 43% kategori temperatur menengah dan persentase sisanya termasuk dalam kategori temperatur rendah. Dengan proporsi sumber daya panas bumi temperatur menengah yang cukup besar tersebut, maka nilai sumber daya panas bumi temperatur menengah ini cukup signifikan mempengaruhi nilai total sumber daya energi panas bumi Indonesia.

Dalam rangkaian kegiatan pengusahaan pemanfaatan tidak langsung energi panas bumi, kegiatan akan dimulai dengan penetapan Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP). Sesuai dengan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 37 Tahun 2017 tentang Wilayah Kerja Panas Bumi Untuk Pemanfaatan Tidak Langsung bahwa area prospek dapat ditentukan sebagai WKP minimal harus dengan status Sumber Daya Kelas Mungkin (*Possible Reserve*) (Kementerian ESDM, 2017). Minimal Sumber Daya Kelas Mungkin ini yang akan digunakan oleh pemerintah dalam merencanakan pemanfaatan energi panas bumi.

Nilai sumber daya panas bumi ini akan digunakan oleh institusi pemerintah untuk merencanakan penggunaan energi baik pemanfaatannya secara independen ataupun sebagai bagian dari pemanfaatan energi terbarukan. Jadi perhitungan sumber daya energi panas bumi yang belum sesuai dengan karakteristik sumber daya energi sebenarnya akan menyebabkan perencanaan pemanfaatan energi kurang akurat.

Tujuan utama dari tulisan ini mendapatkan nilai sumber daya panas bumi kategori temperatur menengah untuk kelas cadangan mungkin yang lebih terpercaya sesuai dengan karakteristik sumber daya tersebut. Untuk mencapai tujuan tersebut akan dilakukan analisis terhadap nilai asumsi parameter-parameter yang kurang tepat apabila digunakan untuk menghitung sumber daya panas bumi temperatur menengah tersebut.

Selanjutnya, dilakukan studi literatur untuk mendapatkan nilai asumsi parameter yang lebih sesuai untuk sumber daya panas bumi temperatur menengah. Akhirnya, dilakukan perhitungan ulang sumber daya panas bumi menggunakan nilai asumsi parameter yang dianggap lebih tepat dan sesuai tersebut. Perhitungan ulang sumber daya panas bumi tersebut dilakukan pada beberapa area prospek dengan kategori temperatur menengah dengan status kelas cadangan mungkin.

METODOLOGI

Metode yang diterapkan pada penelitian ini dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu analisis parameter yang digunakan sebagai input perhitungan sumber daya panas bumi dan perhitungan ulang sumber daya panas bumi untuk kelas cadangan mungkin dengan menggunakan metode volumetrik.

Tiga belas parameter dalam perhitungan sumber daya panas bumi dengan metode volumetrik di analisis kesesuaian nilainya dengan karakter sumber daya panas bumi temperatur menengah di Indonesia. Analisis dilakukan terhadap penerapan metode dan penggunaan nilai asumsi parameter perhitungan sumber daya panas bumi yang dilakukan oleh Badan Geologi. Nilai asumsi parameter tersebut yang dibandingkan dengan nilai asumsi parameter *best practices* yang diterapkan pada referensi literatur yang ada.

Untuk mengurangi ketidakpastian nilai input parameter dalam perhitungan ulang sumber daya panas bumi untuk kelas cadangan mungkin ini, simulasi monte carlo akan diterapkan dengan menggunakan aplikasi *add-ins excel @risk*.

A. Analisis Parameter Input Perhitungan Sumber Daya

Parameter input perhitungan sumber daya panas bumi dapat dikategorikan sebagai parameter yang diperkirakan dari hasil survei lapangan, parameter hasil perhitungan menggunakan formula

tertentu, dan parameter yang diasumsikan. Parameter yang merupakan perkiraan dari analisis dan interpretasi hasil survei lapangan antara lain Luas Daerah Prospek (A), Tebal Reservoir (h), dan Temperatur Reservoir (T). Parameter input yang merupakan hasil perhitungan adalah Energi Dalam (U) dan Densitas Fluida (ρ_L) yang ditentukan menggunakan formula tertentu atau menggunakan *steam table*. Sedangkan sisa nilai parameter input yang lain merupakan hasil dari asumsi dari data/informasi hasil pengukuran lapangan yang ada atau studi literatur.

A.1. Luas Daerah Panas Bumi Prospek (A)

Dalam SNI 13-6482-2000 dan SNI 6482:2018 dijelaskan bahwa penentuan luas dan ketebalan reservoir serta parameter fisik batuan dan fluida diperkirakan didasarkan hasil survei detail terpadu (Badan Standardisasi, 2000, 2018b). Sedangkan SNI 6009:2017 lebih menjelaskan bahwa luas ditentukan dari kompilasi data-data seperti lokasi manifestasi, tahanan jenis, struktur geologi dan data landaian temperatur jika ada. Data tersebut kemudian direpresentasikan dalam peta dengan skala minimal 1:50.000 (Badan Standardisasi, 2017).

Bagaimana cara menarik batas Luas Daerah Prospek panas bumi (A) tidak dijelaskan dalam SNI-SNI yang ada. Badan Geologi menarik batas A berdasarkan studi integrasi tiga survei lapangan yaitu survei geologi, geokimia, dan geofisika. Ada tiga batas area yang ditentukan yaitu batas area minimum, maksimum dan *most-likely*. Batas area minimum digambarkan sebagai area di mana anomali terjadi untuk ketiga jenis survei tersebut. Sedangkan batas area *most-likely*, didefinisikan area di mana anomali nilai gaya berat dan nilai resistivitas dari survei magnetotellurik (MT). Untuk batas area maksimum diambil dari area anomali survei magnetotellurik (MT).

The Australian Geothermal Reporting Code Committee atau AGRCC (2010) menggunakan nilai temperatur *cut-off*

untuk dapat mendelineasi batas bawah volume reservoir yang akan digunakan dalam perhitungan sumber daya. Temperatur *cut-off* sendiri didefinisikan sebagai temperatur minimum di mana pada temperatur tersebut fluida pada sumur dapat mengalir secara alami untuk sistem panas bumi konvektif atau temperatur fluida minimum yang dibutuhkan yang ekonomis untuk sistem panas bumi yang membutuhkan pompa untuk memindahkan fluida ke permukaan.

A.2. Tebal Reservoir (h)

Berdasarkan Badan Standardisasi (2017), Tebal Reservoir (h) ditentukan berdasarkan kedalaman maksimal 3.000 meter dikurangi kedalaman puncak reservoir yang diperkirakan dari model geologi dan geofisika serta data sumur eksplorasi jika tersedia. Ketebalan reservoir dapat ditentukan dimulai kedalaman dari bagian terbawah batuan penudung (*cap rocks*) atau puncak reservoir sampai dengan kedalaman batuan dasar (*basement*) bila diketahui.

Jika kedalaman batuan dasar tidak diketahui maka total kedalaman akan diasumsikan dari total kedalaman pengeboran sumur yang dianggap masih komersial ditambah kedalaman yang masih terpengaruh produksi sumur tersebut. Untuk hal tersebut, SNI 6009:2017 mengasumsikan kedalamannya adalah 3.000 meter. Dalam asumsi perhitungan keekonomian panas bumi, Dinar (2010) mengasumsikan bahwa sumur eksplorasi panas bumi memiliki kedalaman 2.500 meter. Lebih lanjut, Lawless (2007) memberikan gambaran bahwa nilai 500-meter tersebut merupakan tambahan kedalaman sebagai area yang masih dalam jangkauan radius vertikal pengurasan sumur.

Dalam prakteknya, penentuan ketebalan ini akan menggunakan data dan informasi hasil interpretasi pemodelan magnetotellurik (MT) dan/atau hasil pengeboran landaian temperatur jika ada. Dalam SNI 6009:2017, apabila data dan informasi tentang ketebalan reservoir ini

tidak diketahui maka untuk perhitungan sumber daya dapat diasumsikan bahwa ketebalan reservoirnya 1.000 meter.

A.3. Temperatur Reservoir (T)

Temperatur reservoir (T) maksimum yang dimasukkan ke dalam kategori sumber daya panas bumi temperatur menengah adalah 225°C. Nilai untuk Temperatur Awal (T_i) yang akan dipergunakan dalam perhitungan sumber daya panas bumi berasal dari hasil perhitungan geotermometer. Sedangkan Temperatur Akhir (T_f) merupakan temperatur paling rendah yang masih memiliki nilai keekonomian (Ciriaco et al., 2020). SNI 13-6482-2000 dan SNI 6482:2018 menegaskan bahwa penentuan nilai T_f selain aspek ekonomi juga harus memperhatikan aspek teknologi yang ada (Badan Standardisasi, 1999, 2018b).

SNI 6009:2017 tidak menentukan berapa nilai T_f yang dipergunakan untuk menghitung nilai sumber daya. Namun dalam SNI 13-6482-2000 dan SNI 6482:2018, nilai T_f ditentukan sebesar 120°C untuk sumber daya panas bumi temperatur menengah. West Japan Engineering Consultant (2017) menggunakan nilai 130°C sebagai nilai T_f atau setara dengan nilai 0,3 MPaA untuk sumber daya panas bumi kategori temperatur menengah.

Kajian dari Quinlivan (2009) tentang harga biaya produksi listrik dari panas bumi untuk Selandia Baru, sistem panas bumi temperatur menengah diasumsikan memiliki temperatur reservoir maksimum 230°C dan T_f diasumsikan sebesar 134°C, dengan pertimbangan nilai tersebut memiliki nilai *Silica Saturation Index* (SSI) yang masih bisa ditolerir. Dalam studi ini, nilai T_f diambil 120°C selain sesuai dengan SNI juga untuk mengakomodasi sumber daya panas bumi yang memiliki temperatur reservoir pada nilai ambang batas sumber daya temperatur menengah yaitu pada 125°C.

A.4. Saturasi (S)

Saturasi yang menjadi input dalam perhitungan sumber daya yaitu saturasi dalam fasa cair dan saturasi dalam fasa uap. Saturasi (S) adalah nilai perbandingan antara volume fluida dalam pori-pori batuan dengan volume pori-pori batuan. Dalam SNI 13-6171-1999 diasumsikan bahwa Saturasi air 100 % karena fluida dalam reservoir dianggap jenuh air. Tidak dijelaskan lebih lanjut tentang apakah diasumsikan akan terjadi perubahan fasa atau tidak. Jadi dapat diasumsikan bahwa selama proses produksi tidak terjadi perubahan fasa (Badan Standardisasi, 1999). Namun pada SNI 6482:2018, nilai saturasi air untuk sumber daya temperatur menengah diasumsikan sebesar 80% sehingga dapat diartikan bahwa akan terjadi perubahan fasa cair ke fasa uap (Badan Standardisasi, 2018b).

Hal tersebut sudah sesuai dengan apa yang dinyatakan oleh Williams (2004) dan Kaya et al. (2011) bahwa sistem panas bumi dengan reservoir yang bertemperatur di bawah 220°C dikategorikan sebagai Sistem *Hot-Water*. Nilai Saturasi Fasa Cair Awal (S_{Li}) dan Saturasi Fasa Cair Akhir (S_{Lf}) diasumsikan sebesar 100% pada fasa cair. Hal ini berarti bahwa fluida selama perjalanan dari dalam reservoir sampai ke permukaan tidak terjadi perubahan fasa cair menjadi fasa uap. Jadi untuk studi ini, digunakan nilai saturasi fasa cair sebesar 100% untuk awal dan akhir ($S_{Li} = S_{Lf} = 100\%$).

A.5. Densitas Fluida (ρ_f) dan Energi Dalam (U)

Saptadji (2001) mendefinisikan Densitas Fluida (ρ_f) nilai perbandingan antara massa dengan volume dari fasa fluida tersebut. Nilai densitas fluida ini tergantung nilai tekanan dan temperatur. Jika menggunakan *steam table* nilainya kebalikan dari volume spesifik fluida pada tekanan dan temperatur tertentu. Sedangkan Energi Dalam (U) didefinisikan sebagai jumlah energi termal yang dikandung suatu fasa fluida yang tergantung pada tekanan dan temperatur.

Densitas fluida baik Densitas Air Fasa Cair atau fasa *liquid* (ρ_L) maupun Densitas Air Fasa Uap atau fasa *vapor* (ρ_v) dan Energi Dalam (U) dapat ditentukan menggunakan formula atau menggunakan *steam table*. Parameter input yang dibutuhkan untuk menentukan ρ dan U ini adalah temperatur reservoir. Jika ingin menggunakan *steam table*, maka *steam table* dari Rogers & Mayhew (1995) paling sering digunakan. Sedangkan jika menggunakan formula, pilihannya adalah formula dari Tortike & Ali (1989) atau Ashat & Saptadji (2001) dapat digunakan.

Berikut adalah formula perhitungan untuk ρ dan U dari Ashat & Saptadji (2001) yang akan digunakan dalam studi ini.

$$\rho_f = -2.23821695 \cdot 10^{-28} \cdot T^{12} + 4,94472419 \cdot 10^{-23} \cdot T^{10} - 1,48693151 \cdot 10^{-18} \cdot T^8 - 4,68969075 \cdot 10^{-13} \cdot T^6 + 4,76629260 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 - 452735.43928009 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 999.39961079 \dots\dots\dots(1)$$

$$U_f = 4,19 \cdot 10^{-12} \cdot T^6 - 4,096153 \cdot 10^{-9} \cdot T^5 + 1,52643267 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 - 2,63691597 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 2,15772134 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 3,45058994 \cdot T + 7,05389383 \dots\dots\dots(2)$$

Dengan T adalah temperatur fluida fasa cair. Nilai ρ dan U untuk fasa uap tidak digunakan karena asumsi nilai S_w 100%.

A.6. Porositas Batuan Reservoir (ϕ)

Porositas ialah nilai perbandingan volume pori-pori pada batuan dengan volume keseluruhan (*bulk*) dari batuan. Porositas batuan reservoir merupakan parameter yang biasanya diasumsikan dalam perhitungan. Asumsi berdasarkan rata-rata nilai porositas tersebut pada beberapa lapangan seperti dijelaskan pada Badan Standardisasi (1999, 2000, 2017, 2018a, 2018b).

Dalam standar tersebut, nilai porositas diasumsikan sama untuk temperatur tinggi

maupun menengah yaitu sebesar 10%. Nilai tersebut juga merupakan nilai yang digunakan sebagai nilai *most-likely* perhitungan sumber daya panas bumi untuk penyusunan review master plan panas bumi, sedangkan nilai minimum dan maksimumnya sebesar 5% dan 10% (West Japan Engineering Consultant, 2017).

Porositas untuk sistem panas bumi dua fasa dominasi air memiliki nilai antara 15 - 30% (Kaya, Zarrouk, and O'Sullivan 2011). Sedangkan, sistem panas bumi temperatur tinggi akan memiliki nilai porositas yang lebih kecil. Jadi sistem panas bumi temperatur menengah atau sistem *hot-water* diasumsikan memiliki nilai porositas lebih tinggi. Jadi nilai 10% merupakan nilai yang cukup moderat untuk dapat dipergunakan dalam perhitungan. Untuk perhitungan dalam studi ini, nilai minimum, maksimum dan *most-likely* masing-masing di 5%; 15%; dan 10%. Dengan asumsi bentuk distribusi datanya ialah segitiga.

A.7. Kapasitas Panas Batuan (c_r)

Definisi Kapasitas Panas Batuan berdasarkan SNI 13-6171-1999 dan SNI 6169:2018 adalah (C_r) adalah besarnya banyaknya termal yang diperlukan untuk menaikkan temperatur batuan satuan massa sebesar 1°C. Definisi ini sesuai yang diuraikan oleh Saptadji (2001). Untuk sumber daya panas bumi temperatur menengah, kedua SNI menetapkan bahwa asumsi nilai C_r sebesar 0,9 kJ/kg°C dengan interval nilai dinyatakan dalam Saptadji (2001) antara 0,85 – 0,95 kJ/kg°C. Untuk perhitungan, asumsi nilai C_r memiliki data jenis distribusi segitiga dengan nilai minimum, maksimum dan *most-likely* masing-masing di 0,85 kJ/kg°C; 0,95 kJ/kg°C; dan 0,9 kJ/kg°C.

A.8. Densitas Batuan (ρ_r)

Densitas Batuan (ρ_r) merupakan nilai perbandingan antara berat dan volume batuan. Badan Standardisasi (1999) menentukan untuk sumber daya panas bumi temperatur menengah nilainya adalah 2.600 kg/m³.

Sedangkan West Japan Engineering Consultant (2017) mengambil nilai minimum, maksimum dan *most-likely* sebesar 2.400 kg/m³, 2.600 kg/m³ dan 2.500 kg/m³ tanpa membedakan perbedaan temperatur reservoir. Untuk perhitungan dalam studi ini, dengan asumsi distribusi segitiga diambil nilai minimum, maksimum dan *most-likely* sebesar 2.500 kg/m³, 2.700 kg/m³ dan 2.600 kg/m³.

A.9. Faktor Perolehan (R_f)

Faktor Perolehan (R_f) merupakan nilai perbandingan asumsi besaran energi panas maksimum yang dapat digunakan dengan total besaran energi panas yang dikandung dalam reservoir. Untuk perhitungan sumber daya, dalam SNI 13-6482-2000 dan SNI 6482:2018 disebutkan bahwa nilai R_f ini menggunakan asumsi, namun tidak dijelaskan asumsi apa sebaiknya yang digunakan. Mulai dari tahun 2010-an, Badan Geologi menggunakan nilai R_f lebih kecil dari sebelumnya yaitu sebesar 25% dengan nilai sebelumnya sebesar 50%.

Menurut Williams et al. (2008), nilai R_f yang sesuai dengan yang ada saat itu adalah 5 – 20% dengan nilai rata-rata mendekati 10%. Dijelaskan bahwa nilai sebelumnya sebesar 25% yang berasal dari Lapangan Geysers dengan reservoir dua fasa dominasi uap, yang merupakan satu-satunya lapangan yang berproduksi pada saat itu. Lebih lanjut Quinao & Zarrouk (2014) menjelaskan bahwa untuk sistem *hot-water*, yang identik sumber daya panas bumi temperatur menengah, memiliki nilai R_f secara teori bisa mencapai 50% namun secara real nilainya tidak akan lebih dari 25%. Jadi nilai R_f sebesar 25% digunakan dalam perhitungan ulang sumber daya panas bumi temperatur menengah dalam studi ini.

A.10. Lama Waktu Pembangkitan Listrik (t)

Lama Waktu Pembangkitan Listrik (t) adalah asumsi durasi waktu suatu lapangan panas bumi dapat menghasilkan listrik dengan mempertimbangkan

keteknikan, keekonomian dan lingkungan. Menurut Lawless (2007), nilai t ini dapat diambil sampai dengan 50 tahun dengan didasarkan bahwa Lapangan Wairakei di Selandia Baru telah beroperasi lebih dari 50 tahun. Namun pengambilan nilai t harus memperhatikan juga aspek-aspek lain seperti regulasi dan teknologi yang dipergunakan.

SNI 13-6482-2000 dan SNI 6482:2018 menggunakan nilai 30 tahun sebagai standar nilai yang dipergunakan dalam perhitungan sumber daya panas bumi. Dari sisi regulasi, berdasarkan Undang-undang Nomor 21 tahun 2014 tentang Panas Bumi menyatakan bahwa masa pemanfaatan tidak langsung energi panas bumi paling lama 30 tahun. Meskipun, durasi pemanfaatan tersebut dapat diperpanjang (Pemerintah Indonesia, 2014). Namun untuk perhitungan sumber daya biasanya durasi yang dipakai adalah durasi tanpa perpanjangan.

A.11. Faktor Konversi Listrik (η)

Faktor Konversi Listrik (η) adalah nilai persentase atau fraksi yang dipergunakan untuk mengonversi dari satuan energi panas (MW_{th}) ke satuan energi listrik (MW_e). SNI 13-6171-1999 dan SNI 13-6482-2000 asumsi nilai η adalah 10%, ini artinya hanya 10% dari nilai energi panas yang dikandung dapat dikonversikan menjadi energi listrik (Badan Standardisasi, 1999, 2000). Kedua SNI di atas, tidak membedakan nilai ini untuk sumber daya panas bumi bertemperatur tinggi, menengah atau pun rendah. Sedangkan pada SNI terbaru yaitu SNI 6169:2018 dan SNI 6482:2018, nilai faktor konversi ini dibedakan berdasarkan temperatur sumber daya panas bumi. Untuk sumber daya panas bumi temperatur tinggi dan menengah nilai faktor konversi listrik adalah sebesar 10%, sedangkan untuk temperatur rendah sebesar 7% (Badan standardisasi, 2018a, 2018b).

Sebagaimana diketahui bahwa untuk sumber daya panas bumi temperatur menengah akan menggunakan pembangkit listrik dengan sistem binari

yang memiliki teknologi yang berbeda dengan sistem konvensional, karena hal tersebut, akan diambil nilai η dari formula dari Zarrouk & Moon (2014) dibawah ini.

$$\eta = 6,9681 \ln(T_i) - 29,713 \dots\dots\dots(3)$$

Dengan nilai
 η : Faktor Konversi Listrik
 T_i : Temperatur Reservoir Awal

Formula tersebut mengaitkan nilai faktor konversi listrik (η) dengan nilai temperature reservoir awal (T_i), sehingga nilainya tidak tetap, tetapi akan berbeda-beda tergantung pada nilai temperatur reservoir awal tersebut.

A.12. Faktor Kapasitas Pembangkit (L)

Faktor Kapasitas Pembangkit (L) merupakan perbandingan waktu suatu pembangkit listrik dapat menghasilkan listrik dengan total waktu seharusnya pembangkit listrik menghasilkan listrik. Perbedaan tersebut mungkin karena pembangkit tersebut membutuhkan perawatan atau perbaikan dalam kurun waktu tertentu. Dalam SNI 13-6171-1999, SNI 13-6482-2000, SNI 6009:2017, SNI 6169:2018 dan SNI 6482:2018, nilai F ini tidak digunakan sehingga diasumsikan bahwa nilainya tersebut adalah sebesar 100%.

Pembangkit listrik pasti memerlukan pemeliharaan dan perbaikan baik besar (*major overhaul*) maupun kecil (*minor overhaul*). Biasanya, *overhaul* kecil dilakukan setiap tahun, sedangkan *overhaul* besar dilakukan antara 2-4 tahun sekali tergantung pada kondisi pembangkit. Proses *minor overhaul* minor bisa berlangsung dari beberapa hari sampai satu minggu. Sedangkan *major overhaul* bisa berlangsung beberapa minggu. Jadi bisa dipastikan bahwa nilai F tidak mungkin 100%. Maka untuk studi ini, nilai F yang digunakan diambil dari hasil studi yang dilakukan oleh Zarrouk & Moon (2014) yaitu sebesar 92,7% untuk pembangkit sistem binari.

B. Perhitungan Sumber Daya Panas Bumi Temperatur Menengah

Pada tahap kedua ini, dengan menggunakan nilai asumsi parameter yang telah disesuaikan pada tahap pertama (Bagian A) akan dilakukan perhitungan ulang nilai sumber daya pada 19 (Sembilan belas) prospek panas bumi yang data parameter input untuk perhitungan sumber daya tersedia lengkap. Prospek ini dikategorikan sumber daya temperatur menengah dengan kelas cadangan mungkin dan telah dilakukan perhitungan oleh Badan Geologi. Sedangkan titik potensi sisanya hanya tersedia data perkiraan temperatur reservoir.

Perhitungan sumber daya prospek akan menggunakan Persamaan 9, yang telah memasukkan parameter tambahan yaitu Faktor Kapasitas Pembangkit (L).

$$H_{el} = \frac{H_{th} \times R_f \times \eta_c}{L \times t \times 1.000} \dots\dots\dots(4)$$

dengan

$$H_{th} = H_{ei} - H_{ef} \dots\dots\dots(5)$$

dengan

$$H_{ei} = A \cdot h \cdot [(1 - \phi) \cdot \rho_r \cdot c_r \cdot T_i + \phi \cdot (\rho_L \cdot U_L \cdot S_L + \rho_v \cdot U_v \cdot S_v)] \dots\dots\dots(6)$$

$$H_{ef} = A \cdot h \cdot [(1 - \phi) \cdot \rho_r \cdot c_r \cdot T_f + \phi \cdot (\rho_L \cdot U_L \cdot S_L + \rho_v \cdot U_v \cdot S_v)] \dots\dots\dots(7)$$

dengan

$$S_T = S_L + S_v$$

Karena untuk sistem *hot-water*, nilai $S_L = 1$ atau $S_v = 0$, maka persamaan 6 dan 7 menjadi lebih sederhana seperti berikut ini:

$$H_{ei} = A \cdot h \cdot [(1 - \phi) \cdot \rho_r \cdot c_r \cdot T_i + \phi \cdot \rho_L \cdot U_L] \dots\dots\dots(8)$$

$$H_{ef} = A \cdot h \cdot [(1 - \phi) \cdot \rho_r \cdot c_r \cdot T_f + \phi \cdot \rho_L \cdot U_L] \dots\dots\dots(9)$$

keterangan:

H_{el} : sumber daya listrik panas bumi (MW_e)

- H_{th} : energi panas bumi maksimum yang dapat dimanfaatkan (kJ)
- R_f : faktor perolehan (fraksi)
- η_c : faktor konversi listrik (fraksi)
- L : faktor kapasitas pembangkit (fraksi)
- t : lama waktu (umur) pembangkitan listrik (detik)
- H_{ei} : kandungan energi dalam batuan dan fluida pada keadaan awal (kJ)
- H_{ef} : kandungan energi dalam batuan dan fluida pada keadaan akhir (kJ)
- A : luas daerah panas bumi prospek (km²)
- h : tebal reservoir (m)
- ϕ : porositas batuan reservoir (fraksi)
- c_r : kapasitas panas batuan reservoir (kJ/kg°C)
- T_i : temperatur reservoir awal (°C)
- T_f : temperatur reservoir akhir (°C)
- ρ_r : densitas batuan (kg/m³)
- ρ_L : densitas air fasa cair – *liquid* (kg/m³)
- U_L : energi dalam air fasa cair – *liquid* (kJ/kg)
- S_L : saturasi air fasa cair – *liquid* (fraksi)
- ρ_v : densitas air fasa uap – *vapor* (kg/m³)
- U_v : energi dalam air fasa uap – *vapor* (kJ/kg)
- S_v : saturasi air fasa uap – *vapor* (fraksi)

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perbandingan Perbedaan Perhitungan

Secara prinsip perbedaan penentuan kelas cadangan dan kelas sumber daya terletak pada kelayakan suatu lapangan untuk dikembangkan dilihat dari aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan. Kelas cadangan dianggap telah memiliki kelayakan suatu lapangan untuk dikembangkan berdasarkan tiga aspek tersebut (Lawless, 2007 dan Badan Standardisasi Nasional, 1999, 2000, 2017, 2018a, 2018b). Secara teknis, ada tiga kriteria suatu prospek panas bumi dapat dikembangkan lebih lanjut yaitu adanya fluida yang cukup, permeabilitas dan temperatur yang layak (Saptadji, 2001). Berdasarkan hal tersebut, maka sumber daya kelas cadangan mungkin dalam SNI 6009:2017 sebenarnya belum dapat dikategorikan dalam kelas

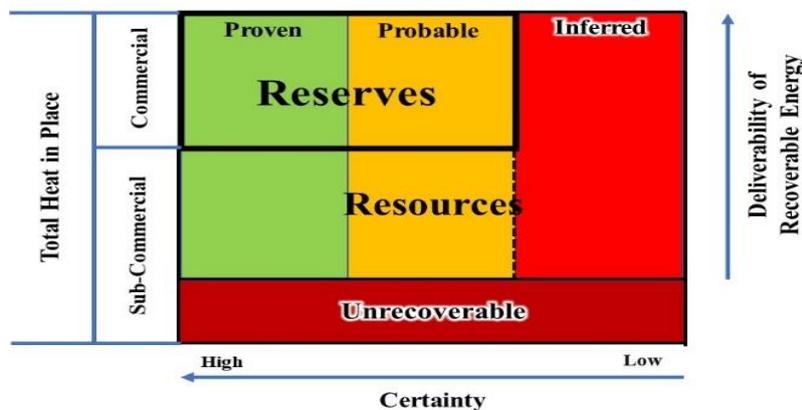
cadangan, namun baru dapat dikategorikan sebagai kelas sumber daya. Hal ini karena belum adanya data dan informasi dari kegiatan pengeboran yang cukup untuk memastikan adanya fluida, permeabilitas dan temperatur yang layak untuk dikembangkan.

Cadangan Mungkin (*possible reserves*) menurut SNI 6009:2017 akan menjadi kelas sumber daya pada klasifikasi sumber daya yang diusulkan Lawless (2007) untuk standar pelaporan cadangan dan sumber daya panas bumi Australia sebagaimana ditunjukkan Gambar 1. Lawless (2007) membagi cadangan menjadi *proven* dan *probable*, sedangkan sumber daya dibagi menjadi *proven*, *probable* dan *inferred*. Masih menurut Lawless (2007), jika menghitung sumber daya panas bumi menggunakan simulasi monte carlo maka hasil P50 merupakan penjumlahan nilai *proven* ditambah *probable*.

Jadi jika hasil perhitungan dengan menggunakan simulasi monte carlo menghasilkan nilai P10 dan P50, maka nilai *proven* adalah nilai P10, sedangkan nilai *probable* adalah nilai P50 dikurangi dengan nilai P10.

A.1. Perbedaan Perhitungan Badan Geologi dan SNI

Terdapat perbedaan parameter dan nilainya dalam metode estimasi sumber daya panas bumi antara yang tercantum dalam, SNI 6009:2017, SNI 6169:2018, dan SNI 6482:2018 dan yang dipergunakan oleh Badan Geologi untuk sumber daya panas bumi temperatur menengah. Tiga perbedaannya utama antara lain parameter energi termal yang terkandung dalam fluida, asumsi nilai temperatur dan saturasi fluida. Tabel 1 menunjukkan perbedaan parameter dan asumsi perhitungan Badan Geologi, perhitungan berdasarkan SNI 6169:2018 dan SNI 6482:2018 dan perhitungan pada studi ini selengkapnya.



Gambar 1. Klasifikasi Sumber Daya dan Cadangan Menurut Lawless (2007)

Tabel 1. Perbedaan parameter dan asumsi perhitungan Badan Geologi, SNI dan perhitungan pada studi

| No | Parameter | SNI | BG | Studi ini |
|----|--|---|---|-------------------------|
| 1. | Energi termal yang terkandung dalam fluida | Energi Dalam | Entalpi | Energi Dalam |
| 2. | Temperatur Akhir | 120°C | Berbeda-beda tergantung Temperatur Awal | 120°C |
| 3. | Perbedaan Saturasi Air Awal dan Akhir | Nilai saturasi Awal dan Akhir berbeda ($S_{wi} = 100\%$ & $S_{wfr} = 80\%$) | Nilai saturasi Awal dan Akhir berbeda | Tetap (100%) |
| 4. | Faktor Konversi Listrik | 10% | Berbeda-beda | Menggunakan persamaan 3 |
| 5. | Faktor Kapasitas Pembangkit | Tidak ada (asumsi 100%) | Tidak ada (asumsi 100%) | 92,7% |

Perbedaan pertama adalah parameter energi termal dalam fluida. Badan Geologi mempergunakan nilai entalpi (H) sedangkan SNI 6169:2018 mempergunakan nilai Energi Dalam (U). Penggunaan nilai entalpi ini sama dengan yang digunakan oleh standar pelaporan sumber daya panas bumi Australia dari AGRCC (2010). Penggunaan nilai Energi Dalam seperti yang digunakan dalam SNI 6169:2018 sudah sesuai dengan saran dari Ciriaco et al. (2020). Hal ini dikarenakan Energi Dalam lebih sesuai untuk keadaan statis seperti lapangan yang belum diproduksi. Entalpi sendiri merupakan penjumlahan dari Energi Dalam (U) dengan energi yang dihasilkan oleh kerja karena adanya tekanan seperti digambarkan dalam Persamaan 10.

$$H_L = U_L + \frac{P}{V_L} \dots\dots\dots(10)$$

dengan

- H_L : entalpi fasa cair (kJ/kg)
- P : tekanan (bar)
- U_L : energi dalam (kJ/kg)
- V_L : volume spesifik (m³/kg)

Perbedaan kedua ialah nilai asumsi parameter Temperatur Akhir (T_f). SNI dalam Badan Standarisasi (1999, 2000, 2018a, 2018b) menetapkan nilai sebesar 120°C, sedangkan Badan Geologi menggunakan nilai yang berbeda-beda antara 90°C sampai dengan 150°C tergantung pada nilai Temperatur Awal (T_i) suatu sumber daya panas bumi.

Perbedaan ketiga ialah nilai asumsi parameter Saturasi Air (S_w). SNI 13-6171-1999 dan SNI 13-6482-2000 menetapkan asumsi nilai S_w dari awal sampai akhir adalah 100%, jadi tidak terjadi perubahan fasa pada air dari fasa *liquid* ke fasa *vapor*. Asumsi dari SNI ini bahwa tidak terjadi perubahan fasa pada fluida sudah sesuai dengan hasil studi dari Kaya et al. (2011) yang menyatakan bahwa sistem yang bertemperatur di bawah <220°C dikategorikan sebagai Sistem *Hot-Water*.

Sedangkan pada SNI terbaru yaitu SNI 6482:2018, menetapkan asumsi nilai S_w untuk sumber daya temperatur menengah diasumsikan sebesar 80% (Badan Standardisasi, 2018b). Jadi pada SNI terbaru dan perhitungan Badan Geologi mengasumsikan terjadi perubahan fasa dari awal sampai akhir produksi sehingga nilai S_w awal dan S_w akhir berbeda.

A.2. Perbedaan Perhitungan SNI 6169:2018 dan Metode Lain

Perbedaan lain antara SNI 6169:2018 dengan sistem perhitungan volumetrik yang lain adalah Faktor Kapasitas Pembangkit (L). Pada SNI tidak menggunakan nilai parameter L dalam penghitungannya sama dengan Saptadji (2001), Sarmiento & Bjornsson (2007) dan Sarmiento et al. (2013). Sedangkan sistem perhitungan volumetrik yang menggunakan nilai L antara lain Lawless (2007), Lawless et al. (2010), Quinao & Zarrouk (2014); Zarrouk & Simiyu (2013).

A.3. Contoh Perhitungan Badan Geologi dan Studi Ini

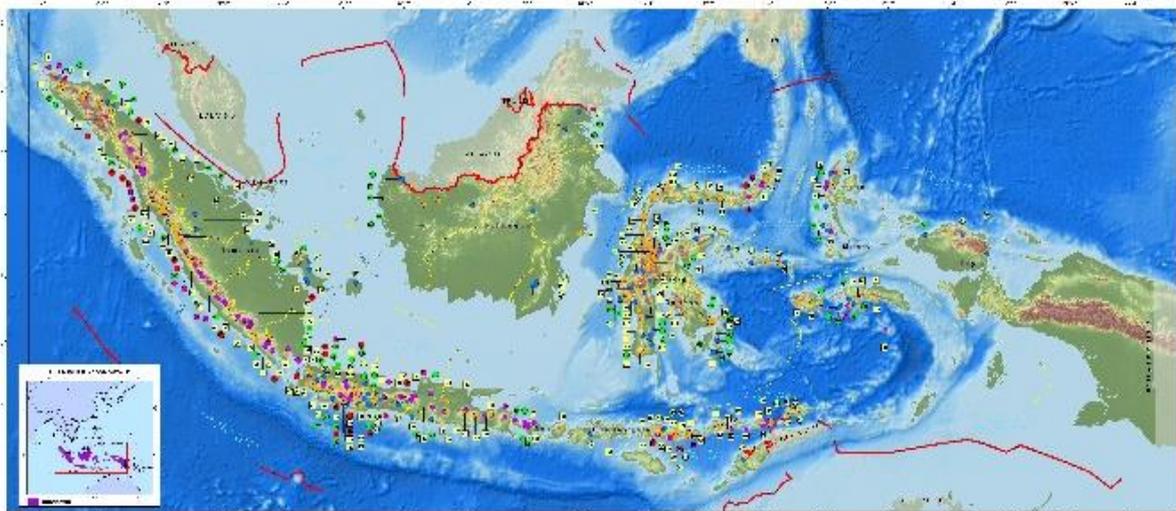
Sebagai contoh perhitungan sumber daya panas bumi pada studi ini, kami mengambil Area Prospek Panas Bumi Gunung Pandan yang berada di Provinsi Jawa Timur. Tabel 2 menunjukkan perbedaan nilai parameter perhitungan pada studi ini dan parameter yang digunakan Badan Geologi. Hasil perhitungan ulang sumber daya panas bumi *most-likely* (P50) untuk area tersebut sebesar 23,3 MW_e, sedangkan hasil perhitungan oleh Badan Geologi sebesar 30 MW_e. Jadi hasil perhitungan studi ini mengurangi nilai sumber daya panas bumi sebesar 22% hasil perhitungan Badan Geologi.

B. Struktur Data Sumber Daya Panas Bumi Temperatur Menengah

Saat ini terdapat 131 titik potensi yang memiliki sumber daya panas bumi kelas cadangan mungkin dari total 356 titik potensi (Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, 2022) sebagaimana terlihat pada Gambar 2.

Tabel 2. Contoh nilai parameter-parameter perhitungan Badan Geologi dan perhitungan pada studi ini

| No | Parameter | Unit | Studi Ini | | | | Badan Geologi | | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|--------|---------------|-----------|-----------|--------|
| | | | Min | Most | Max | Fix | Min | Most | Max | Fix |
| 1 | Luas Area (A) | Km ² | 12 | 15 | 18 | | 12 | 15 | 18 | |
| 2 | Ketebalan (h) | m | 1.000 | 1.000 | 1.500 | | 1.000 | 1.000 | 1.500 | |
| 3 | Porositas (ϕ) | % | 5 | 10 | 15 | | 5 | 10 | 15 | |
| 4 | Densitas Batuan (ρ_r) | kg/m ³ | 2.000 | 2.500 | 2.700 | | 2.400 | 2.500 | 2.500 | |
| 5 | Kapasitas Panas Batuan (c_r) | kJ/kg°C | 0,8 | 0,9 | 1 | | 0,8 | 1 | 1 | |
| 6 | Temperatur Awal (T_i) | °C | 150 | 165 | 170 | | 150 | 165 | 170 | |
| 7 | Temperatur Akhir (T_f) | °C | | | | 120 | 120 | 120 | 150 | |
| 8 | Saturasi Air Awal (S_{wi}) | % | | | | 100 | 80 | 100 | 100 | |
| 9 | Saturasi Air akhir (S_{wf}) | % | | | | 100 | 30 | 50 | 50 | |
| 10 | Faktor perolehan (R) | % | | | | 25 | | | | 25 |
| 11 | Faktor konversi listrik (η_c) | % | | | | 5,7 | | | | 7 |
| 12 | Faktor Kapasitas Pembangkit (L) | % | | | | 92,7 | | | | - |
| 13 | Lama pembangkitan listrik (t) | tahun | | | | 30 | | | | 30 |
| 14 | Random Number (N) | kali | | | | 10.000 | | | | 10.000 |
| Sumber Daya Panas Bumi | | MW_e | 17,2 | 23,3 | 30,4 | | 20 | 30 | 41 | |



Gambar 2. Peta Distribusi dan Sumber Daya Panas Bumi Indonesia (Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, 2022)

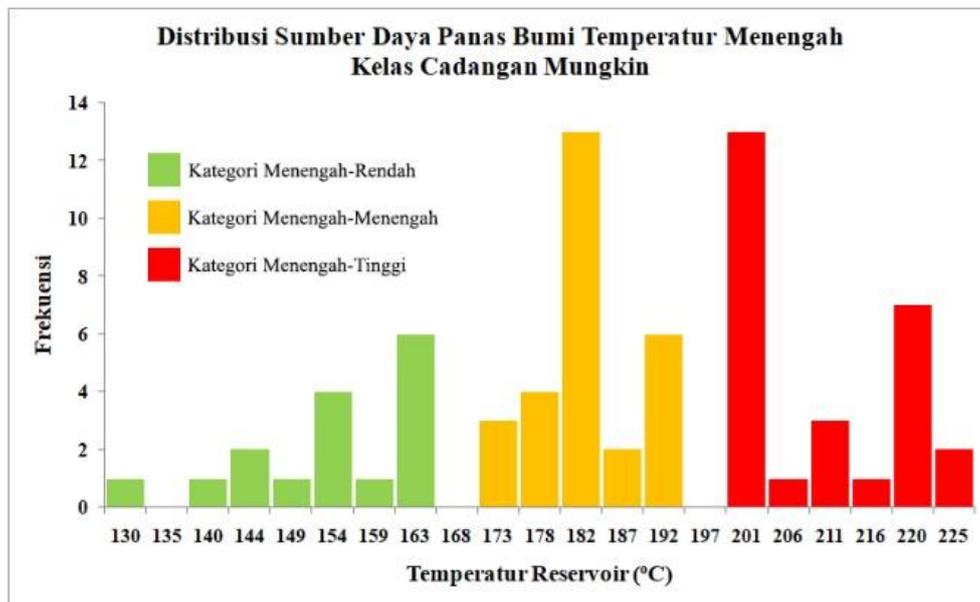
Dengan mengacu pada Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (2022), dari 131 tersebut, 55 titik potensi (42%) digolongkan sebagai sumber daya panas bumi temperatur tinggi, 71 titik potensi (54%) sebagai sumber daya panas bumi temperatur menengah dan sisanya sebagai sumber daya panas bumi temperatur rendah. Sedangkan jika berdasarkan besar nilai energi dalam MW_e, maka proporsi sumber daya panas bumi temperatur menengah ini mencapai 39% atau setara dengan 3.482 MW_e.

Gambar 3 merupakan histogram sumber daya panas bumi temperatur menengah

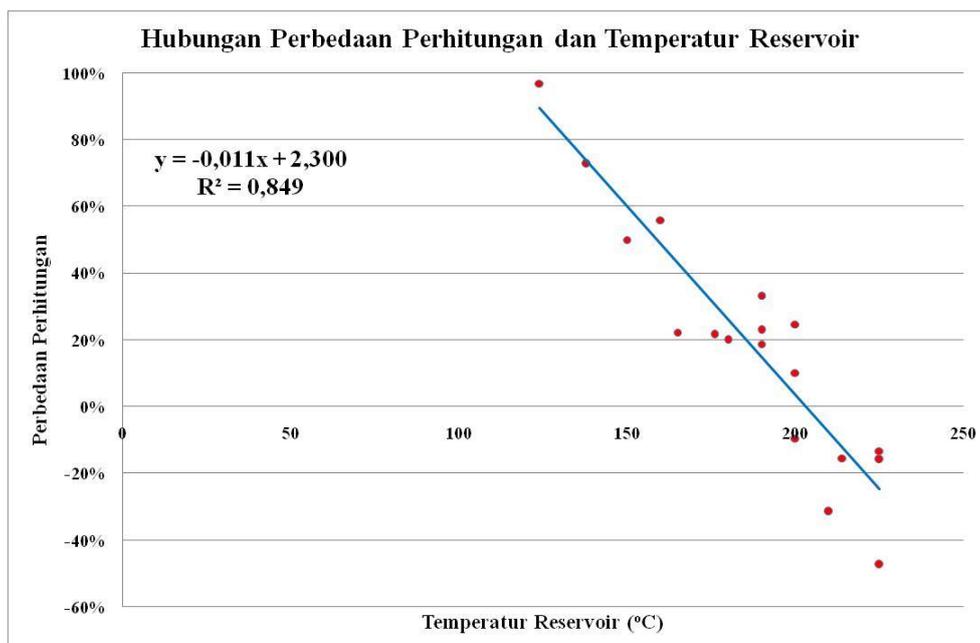
kelas cadangan mungkin di Indonesia. Dengan asumsi data memiliki distribusi normal, maka dapat dihitung bahwa nilai rata-rata temperatur sumber daya menengah kelas cadangan mungkin adalah sebesar 184°C. Dengan mengacu histogram yang sama, secara sederhana dapat dilihat terdapat tiga populasi sumber daya panas bumi yang berbeda, yaitu populasi dengan interval 130-165°C; 165-200°C, dan 200-225°C yang dapat dinamai secara berturut-turut sebagai sumber daya panas bumi kategori temperatur menengah-rendah, temperatur menengah-menengah dan temperatur menengah-tinggi.

Setelah dilakukan perhitungan ulang, terdapat perbedaan antara perhitungan dalam studi ini dan perhitungan Badan Geologi. Contoh perbedaan nilai parameter-parameter yang digunakan antara yang dilakukan studi ini dan perhitungan Badan Geologi sebagaimana tercantum pada Tabel 2. Ada indikasi korelasi yang kuat antara persentase perbedaan perhitungan keduanya tersebut

dengan temperatur reservoir yang ditunjukkan dengan nilai R^2 sebesar 85%. Korelasi keduanya dapat dilihat pada Persamaan 11 yang merupakan hasil regresi linear. Korelasi tersebut menunjukkan tren apabila semakin besar temperatur reservoir maka semakin kecil persentase perbedaannya, sebagaimana dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3. Histogram Sumber Daya Panas Bumi Temperatur Menengah di Indonesia



Gambar 4. Hubungan Persentase Perbedaan Perhitungan Badan Geologi dan Studi Ini dengan Temperatur Reservoir

$$\Delta MW = -0,011 \cdot T_i + 2,3 \dots\dots\dots(11)$$

Korelasi yang kuat ini mengindikasikan adanya perbedaan yang sistematis antara kedua perhitungan. Hal ini diduga karena dalam perhitungan Badan Geologi diasumsikan adanya perubahan fasa air dari fasa cair (*liquid*) ke fasa uap (*vapor*), sedangkan perhitungan pada studi ini diasumsikan tidak ada perubahan fasa air. Kemungkinan perubahan fasa air ini akan semakin besar seiring dengan semakin tinggi temperatur reservoir. Sedangkan perbedaan nilai *input* parameter yang lain hanya mengurangi nilai besaran nilai sumber daya secara proporsional.

Persamaan 11 diterapkan pada area prospek panas bumi yang lain dengan kategori sumber daya temperatur menengah kelas cadangan mungkin dengan *input* temperatur reservoir menghasilkan persentase pengurangan nilai sumber daya adalah sebesar 27% atau sebesar 940 MW_e dari perhitungan Badan Geologi. Hal tersebut mengakibatkan nilai sumber daya panas bumi temperatur menengah yang sebelumnya mencapai 3.482 MW_e berkurang menjadi total 2.541 MW_e.

C. Hubungan Nilai Sumber Daya Dengan Perencanaan Energi

Untuk perencanaan kebijakan energi, hasil studi ini dapat digunakan dengan tujuan optimalisasi pemanfaatan sumber daya panas bumi temperatur menengah di Indonesia. Perencanaan pemanfaatan energi panas bumi dapat lebih akurat karena hasil studi ini menggunakan parameter-parameter yang lebih sesuai dengan karakteristik sumber daya temperatur menengah.

Dalam histogram pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa distribusi titik potensi sumber daya temperatur menengah kelas cadangan mungkin paling banyak pada interval temperatur 180-200°C. Sebagai contoh, untuk penetapan harga listrik yang berasal dari sumber daya panas bumi temperatur menengah berdasarkan

production cost analysis seperti yang dilakukan Nugraha et al. (2017), maka asumsi temperatur reservoir dapat menggunakan interval temperatur tersebut. Sedangkan jika ingin menggunakan nilai energi dalam satuan MW_e sebagai dasar rencana pengembangan energi panas bumi temperatur menengah, maka nilai sumber daya panas bumi dari Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (2022), sebaiknya dilakukan pengurangan nilai MW_e terlebih dahulu menggunakan Persamaan 11 sehingga tidak *overestimate* dalam penentuan nilai sumber daya panas bumi temperatur menengah dalam perencanaan kebijakan energi.

Nilai *overestimate* sumber daya panas bumi temperatur menengah ini akan berdampak perencanaan kapasitas terpasang pembangkit dan perhitungan keekonomian yang tidak akurat. Nilai keekonomian harga listrik dari panas bumi, akan sangat tergantung pada kualitas yang diwakili temperatur reservoir dan kuantitas yang diwakili besarnya kapasitas terpasang pembangkit.

Perhitungan keekonomian yang tidak akurat dapat mengakibatkan lelang Wilayah Kerja Panas Bumi kurang diminati para calon investor. Hal ini karena nilai asumsi kapasitas terpasang pembangkit lebih besar dan acuan temperatur reservoir yang digunakan pemerintah lebih tinggi. Sehingga pemerintah dapat menganggap bahwa harga yang ditetapkan sudah cukup menarik secara perhitungan keekonomian, sedangkan investor menganggap harga yang ada belum cukup untuk mendapatkan nilai *investment return* yang diinginkan.

KESIMPULAN

Kelas cadangan mungkin (*possible reserves*) energi panas bumi dalam SNI 6009:2017 sebenarnya belum dapat dikategorikan dalam kelas cadangan, namun baru dapat dikategorikan sebagai kelas sumber daya apabila penentuan nilai sumber daya tersebut didasarkan *the Australian Geothermal Reporting Code*

Committee (AGRCC).. Hal ini karena belum adanya data dan informasi dari kegiatan pengeboran yang cukup untuk memastikan adanya fluida, permeabilitas dan temperatur yang layak untuk dikembangkan berdasarkan asepek teknis.

Perbedaan hasil perhitungan Badan Geologi dan hasil perhitungan pada studi ini dikarenakan perbedaan penentuan pada lima asumsi nilai parameter. Kelima parameter tersebut yaitu perhitungan termal yang terkandung dalam fluida, temperatur akhir, saturasi air, faktor konversi listrik dan faktor kapasitas pembangkit. Untuk perhitungan yang dilakukan Badan Geologi, terdapat satu parameter yang tidak dipertimbangkan yaitu faktor kapasitas pembangkit (L). Hal ini bisa diartikan bahwa efisiensi kapasitas pembangkit dianggap 100%.

Berdasarkan analisis histogram, nilai rata-rata temperatur sumber daya menengah kelas cadangan mungkin adalah sebesar 184°C. Selain itu, terdapat tiga populasi sumber daya panas bumi yang berbeda, yaitu populasi dengan interval 130-165°C; 165-200°C, dan 200-225°C yang dapat dinamai secara berturut-turut sebagai sumber daya panas bumi kategori temperatur menengah-rendah, temperatur menengah-menengah dan temperatur menengah-tinggi.

Perbedaan persentase perhitungan Badan Geologi dan studi ini menunjukkan adanya korelasi kuat ($R^2 = 85\%$) yang mengindikasikan adanya perbedaan yang sistematis, yang diduga karena dalam perhitungan Badan Geologi diasumsikan adanya perubahan fasa air dari fasa cair (*liquid*) ke fasa uap (*vapor*), sedangkan perhitungan pada studi ini diasumsikan tidak ada perubahan fasa air.

Hasil perhitungan ulang dengan menggunakan korelasi perbedaan persentase hasil perhitungan Badan Geologi dan studi ini dengan temperatur reservoir menghasilkan pengurangan nilai sumber daya panas bumi sebesar 27%

atau sebesar 940 MW_e dari perhitungan oleh Badan Geologi. Hal tersebut mengakibatkan nilai sumber daya temperatur menengah yang sebelumnya mencapai 3.482 MW_e berkurang menjadi total 2.541 MW_e.

Dengan mengetahui populasi sumber daya panas bumi temperatur menengah kelas cadangan mungkin dan besar nilai sumber daya temperatur menengah yang lebih akurat bisa digunakan untuk perencanaan kebijakan energi lebih tepat. Sehingga perencanaan kebijakan energi dengan tujuan optimalisasi pemanfaatan sumber daya panas bumi temperatur menengah di Indonesia dapat dicapai. Perhitungan sumber daya panas bumi lebih akurat karena menggunakan nilai asumsi parameter yang lebih sesuai dengan karakteristik sumber daya panas bumi temperatur menengah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ucapkan terima kasih kepada Koordinator Panas Bumi Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP) atas izin penggunaan data untuk penulisan makalah ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada tim editor dan para reviewer yang telah memberikan koreksi serta saran dalam perbaikan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ashat, A., & Saptadji, N. M. (2002). Correlations for Thermodynamic Properties of Pure Water At Saturation Condition. In *Teknik Panas Bumi* (p. 305). ITB.
- Badan Standardisasi Nasional. (1999). *Metode Estimasi Potensi Energi Panas Bumi*. SNI 13-6171-1999. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2000). *Angka Parameter dalam Estimasi Potensi Energi Panas Bumi*. SNI 13-6482-2000. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *Klasifikasi Sumber Daya dan Cadangan Energi Panas Bumi Indonesia*. SNI 6009:2017. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2018a). *Metode Estimasi Potensi Energi Panas Bumi*. SNI 6169:2018. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2018b). *Parameter dalam Estimasi Potensi Energi Panas Bumi*. SNI 6482:2018. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Ciriaco, A. E., Zarrouk, S. J., & Zakeri, G. (2020). Geothermal resource and reserve assessment methodology: Overview, analysis and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109515. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109515>
- Danar, A. (2010). Keputusan Investasi Panas Bumi Di Indonesia. In *Energi Panas Bumi Di Indonesia* (pp. 61–179). Badan Geologi.
- Direktorat Panas Bumi. (2014). *Penyiapan Data dan Informasi Awal untuk Penyusunan Masterplan Panas Bumi*.
- Kaya, E., Zarrouk, S. J., & O'Sullivan, M. J. (2011). Reinjection in geothermal fields: A review of worldwide experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 47–68. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.032>
- Kementerian ESDM. (2017). Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 37 Tahun 2017 Tentang Wilayah Kerja Panas Bumi Untuk Pemanfaatan Tidak Langsung.
- Lawless, J. (2007). *Discussion Paper on Guidelines for Geothermal Reserves Definition*.
- Lawless, J. v, Ward, M., & Beardsmore, G. (2010). The Australian code for geothermal reserves and resources reporting: practical experience. *Proceedings of the World Geothermal Congress*.
- Nugraha, H., Saefulhak, Y., & Pangaribuan, B. (2017). A Study on the Impacts of Incentives to the Geothermal Energy Electricity Price in Indonesia using Production-based Cost Approach. *The 5th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition (IIGCE)*.
- Pemerintah Indonesia. (2014). Undang-Undang Nomor 21 tahun 2014 tentang Panas Bumi.
- Pusat Sumber Daya Mineral Batubara Panas Bumi. (2022). *Peta Potensi dan Distribusi Panas Bumi Indonesia*.
- Quinao, J. J., & Zarrouk, S. J. (2014). A Review of the Volumetric Stored-Heat Resource Assessment: One Method, Different Result. *Proceedings of 36th New Zealand Geothermal Workshop*, 24–26.
- Quinlivan, P. (2009). Assessment of Current Costs of Geothermal Power Generation in New Zealand (2007 Basis). *New Zealand Geothermal Association*, 74.
- Rogers, G. F. C., & Mayhew, Y. R. (1995). *Thermodynamic and transport properties of fluids*. John Wiley & Sons.
- Saptadji, N. M. (2001). *Teknik Panas Bumi. Bandung, Penerbit ITB*.
- Sarmiento, Z. F., & Bjornsson, G. (2007). Geothermal resource assessment-volumetric reserves estimation and numerical modelling. *Reykjavik, Iceland: United Nations University-Geothermal Training Programme and La Geo*.
- Sarmiento, Z. F., Steingrimsson, B., & Axelsson, G. (2013). Volumetric resource assessment. *Proceedings of the Short Course V on Conceptual Modelling of Geothermal Systems, Santa Tecla, El Salvador*, 2.
- The Australian Geothermal Reporting Code Committee (AGRCC). (2010). *Australian Code for Reporting of Exploration Results, Geothermal Resources and Geothermal Reserves - The Geothermal Reporting Code*.

- Tortike, W. S., & Ali, S. M. F. (1989). Saturated-Steam-Property Functional Correlations for Fully Implicit Thermal Reservoir Simulation. *SPE Reservoir Engineering*, 4(04), 471–474. <https://doi.org/10.2118/17094-PA>
- West Japan Engineering Consultant. (2017). *Review of the Target of Geothermal Development Plan*.
- Williams, A. F., Lawless, J. v, Ward, M. A., Holgate, F. L., & Larking, A. (2010). A code for geothermal resources and reserves reporting. *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Williams, C. F. (2004). Development of revised techniques for assessing geothermal resources. *Proceedings, 29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University*.
- Williams, C. F., Reed, M., & Mariner, R. H. (2008). *A Review of Methods Applied by the US Geological Survey in the Assessment of Identified Geothermal Resources*. (p. 27). US Department of Interior, US Geological Survey.
- Zarrouk, S. J., & Moon, H. (2014). Efficiency of geothermal power plants: A worldwide review. *Geothermics*, 51, 142–153. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.11.001>
- Zarrouk, S. J., & Simiyu, F. (2013). A review of geothermal resource estimation methodology. *Proceedings, New Zealand Geothermal Workshop, Rotorua*.

| | |
|-----------|--------------------|
| Diterima | : 18 Oktober 2022 |
| Direvisi | : 31 Oktober 2022 |
| Disetujui | : 30 November 2022 |