

**PEMANFAATAN HASIL-HASIL RISET PANASBUMI
UNTUK MEMPERKAYA
MATERI PEMBELAJARAN FISIKA**

Suharno^{1,2}

1. Anggota Himpunan Ahli Geofisika Indonesia
2. Guru Besar Geotermal, Teknik Geofisika Universitas Lampung
Suharno_fisika@yahoo.co.id

ABSTRAK

Indonesia memiliki cadangan energi panas bumi terbesar di dunia mencapai 40% dari seluruh cadangan sumber energi panas bumi dunia. Indonesia merencanakan power plant dengan tenaga panas bumi berkapasitas 9500 MWe pada tahun 2025 yang didukung oleh UU No 27 tahun 2003 tentang energi panas bumi. Sumber panasbumi berasal dari distribusi suhu dan energi panas di bawah permukaan bumi. Energi panasbumi dapat diklasifikasikan berdasarkan sumber panasnya menjadi lima bagian: (1) energi magma (*magma energy*), (2) energi panas batuan kering (*hot dry rock energy*), (3) energi bumi (*earth energy*), (4) energi tekanan bumi (*geopresure energy*), dan (5) energi hidrotermal (*hydrothermal energy*). Energi hidrotermal adalah energi panas bumi, yang berupa energi panas yang tersimpan di dalam fluida dan batuan di bawah permukaan bumi. Sumber panasbumi berasal dari distribusi suhu dan energi panas di bawah permukaan bumi. Suhu di permukaan ditentukan oleh konduksi panas melalui batuan padat dan konveksi di dalam sirkulasi fluida. Berdasarkan pada kelengkapan data hasil penelitian, tingkat klasifikasi estimasi potensi dapat dikelompokkan sebagai berikut: (1) Klas sumber daya spekulatif, (2) Klas sumber daya hipotesis, (3) Klas Cadangan terduga (*possible*), (4) Klas Cadangan mungkin (*probable*), (5) Cadangan terbukti (*proven*). Contoh riset panas bumi di wilayah Sumatera Barat antara lain: Prospek Paasbumi Gunung Talang dan Bukit Kili Sumatra Barat. Besarnya potensi energi listrik Prospek Panas Bumi Gunung talang adalah sekitara 145 MWe sedangkan Prospek Panas Bumi Bukit Kili adalah sekitar 75 MWe, sehingga ke dua lapangan panas bumi tersebut dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit tenaga listrik. Hal ini sangat baik untuk memperkaya materi pemebelajaran Fisika.

Kata kunci: panas bumi, klasifikasi sumberdaya & cadangan, Gunung Talang & Bukit Kili.

I. PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada jalur vulkanik memiliki sekitar 200 buah gunung api yang berpotensi menjadi sumber energi panas bumi, sehingga Indonesia merupakan salah satu negara di dunia yang kaya akan sumber energi panas bumi. Total potensi panas bumi dunia menurut World Geothermal Congress (WGC) 2010, setara dengan 40.000 GWe, sedangkan kebutuhan energi dunia setara 15.000 GWe, sehingga energi panas bumi, secara logika, dapat mengatasi keperluan energi dunia". Potensi panas bumi yang sedemikian besarnya belum dioptimalkan pemanfaatannya, bukan hanya di Indonesia, bahkan di negara-negara di dunia pada umumnya.

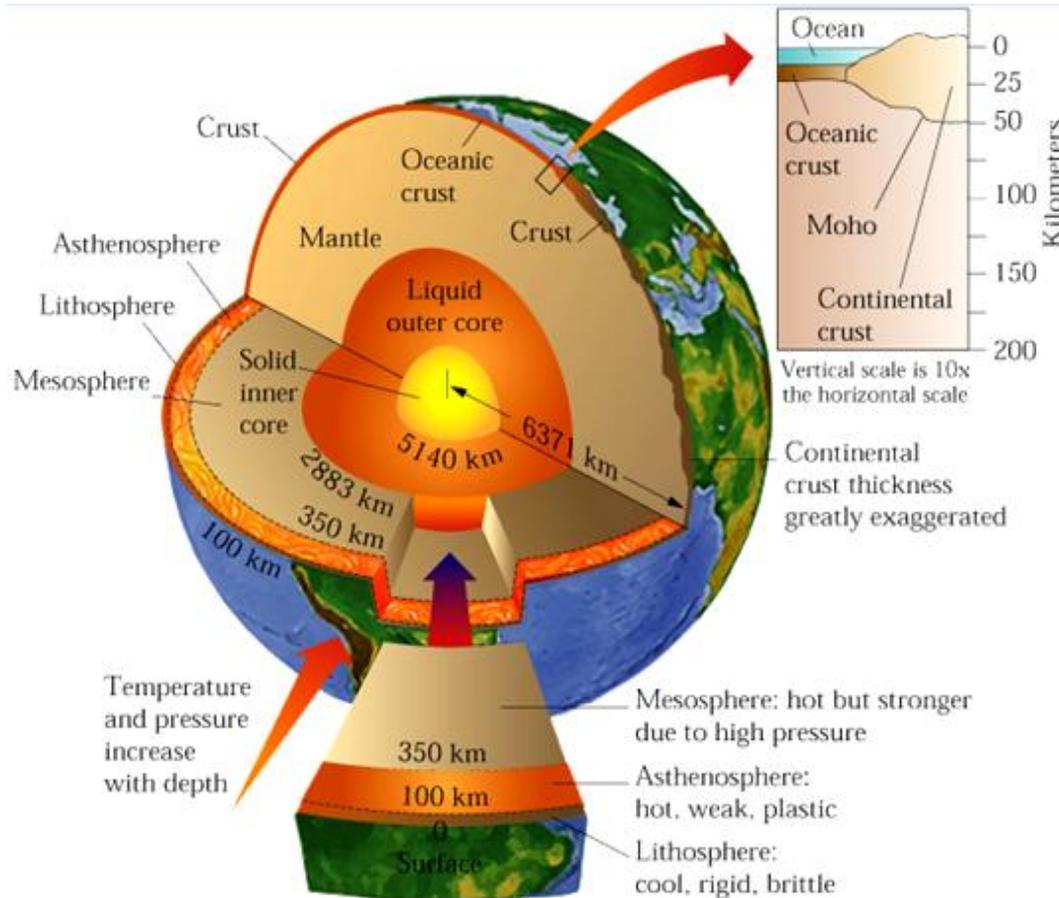
Energi panas bumi berpotensi menggantikan energi fosil sebagai sumber energi. Potensi panas bumi Indonesia yang mencapai 27 GWe jika keseluruhan sumberdayanya dipakai akan dapat menggantikan BBM sekitar 12 milyar barel. Sumber daya sebesar 29.000 MWe, merupakan cadangan energi panas bumi terbesar di dunia (40% dari seluruh cadangan sumber energi panas bumi dunia). Namun, potensi tersebut belum dimanfaatkan secara optimal, bahkan sampai saat ini, Indonesia baru memanfaatkan kurang dari 1.500 MWe.

Untuk mengatasi ketimpangan tersebut, pemerintah Indonesia merencanakan power plant dengan tenaga panas bumi berkapasitas 9500 MWe pada tahun 2025 yang didukung oleh UU No 27 tahun 2003 tentang energi panas bumi, Perpres No. 5 tahun 2006 tentang kebijakan energi nasional, PP No. 59 tahun 2007 tentang Kegiatan Usaha Panas Bumi, dan PerMen ESDM No. 02 tahun 2009 tentang Pedoman Penugasan Survei Pendahuluan Panas Bumi.

Undang-undang dan peraturan tersebut dimaksudkan untuk mendorong pengembangan dan pemanfaatan panas bumi.

II. ENERGI PANAS BUMI

Sumber panas bumi berasal dari distribusi suhu dan energi panas di bawah permukaan bumi. Suhu di bawah permukaan bumi sangat bervariasi bergantung pada pengaruh: tekanan di bawah permukaan bumi, jenis material penyusun lapisan bumi, kedalaman posisi di bawah permukaan bumi. Lapisan bawah permukaan bumi diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur pelapisan bumi. (John Weley and sons, 1999)

Struktur lapisan bumi terdiri atas: (1) lapisan kerak bumi (crust), (2) mantel, dan (3) inti bumi. Kerak bumi adalah lapisan bumi terluar bersifat keras dan padat terdiri atas batuan sidemen, batuan beku, dan batuan metamorphosis, dengan kandungan unsur utama oksigen dan silicon, ketebalan sekitar 100 km. Kerak bumi ada dua jenis yaitu kerak benua dan kerak samudera. Kerak benua berupa daratan dengan ketebalan antara 20 s.d. 70 km, banyak mengandung unsur silikon dan aluminium (sial). Kerak samudera tertutup oleh perairan lautan (samudera), memiliki ketebalan sekitar 5 s.d. 10 km, banyak mengandung silikon dan magnesium (sima).

Mantel bumi mempunyai dua bagian yaitu mantel luar (astenosfera) dan mantel dalam (mesosfera). Mantel luar (astenosfera) terdiri atas lapisan ultra basal dan mineral. Astenosfera mempunyai ketebalan antara 40 s.d. 400 km, dan memiliki suhu antara 1300 s.d. 1500°C. Mantel dalam (mesosfera) terdiri atas senyawa padat (MgO, dan SiO₂), memiliki suhu antara 1500 s.d. 3000°C.

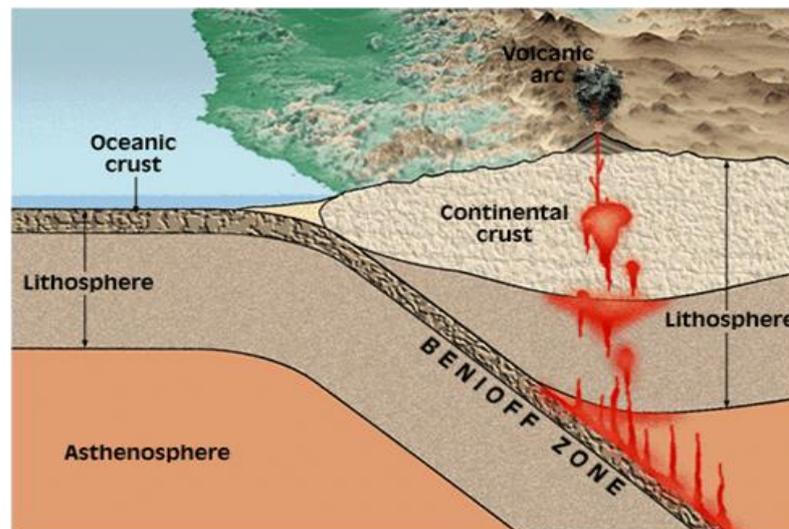
Inti bumi mempunyai dua bagian yaitu inti luar dan inti dalam. Inti luar bersifat cair pekat, memiliki ketebalan sekitar 2900 km dan suhu sekitar 3.900°C. Inti luar, diperkirakan material

utamanya tersusun dari besi karena massa jenis inti ini hampir sama dengan massa jenis besi. Inti dalam tersusun oleh kristal besi, besi-nikel, dan memiliki suhu sekitar 4800°C .

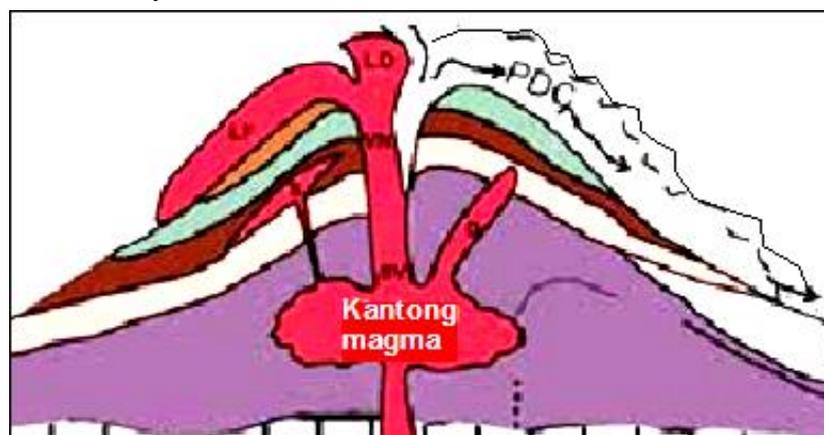
Pada bagian kerak bumi memiliki gradient suhu yang disebut gradient suhu geometris. Gradient suhu tersebut dipengaruhi oleh sistem gunung api dan kondisi air tanah. Gradient suhu geometris umumnya suhu akan naik 1°C pada setiap perubahan kedalaman 33 meter ke bawah permukaan. Angka 33 meter disebut angka geotermis.

Suhu di permukaan ditentukan oleh konduksi panas melalui batuan padat dan konveksi di dalam sirkulasi fluida. Suhu di dalam bumi (di bawah permukaan) bumi bertambah besar secara konstan selaras dengan bertambahnya kedalaman pada sistem panas bumi. Suhu bumi yang berubah tergantung dari kedalamannya yang disebut "gradient geothermal".

Suhu bumi pada bagian tertentu dan kedalaman tertentu bisa jadi sangat tinggi. Hal ini disebabkan adanya tumbukan lempengan samudra dan benua di daerah subduksi seperti tampak pada Gambar 2. Pada bagian ini suhunya akan menjadi sangat tinggi, sehingga batuan padat akan menjadi magma cair. Magma cair tersebut sesuai dengan kondisi geologi tertentu akan menerobos ke permukaan, membentuk intrusi batuan beku atau aktivitas gunung api.



Gambar 2. Proses subduksi yang menghasilkan gunung api di bagian kerak benua. Lelehan magma terjadi karena gesekan kerak samudra dengan litosfera dan astenosfera pada suhu dan tekanan tinggi (John Weley and Sons, 1999).



Gambar 3. Sistem gunung api aktif yang memiliki kantong magma besar (Suharno, 2012).

2.1. Jenis-jenis Energi Panas Bumi

Energi panas bumi dapat diklasifikasikan berdasarkan sumber panasnya menjadi lima bagian: (1) energi magma (*magma energy*), (2) energi panas batuan kering (*hot dry rock energy*), (3)

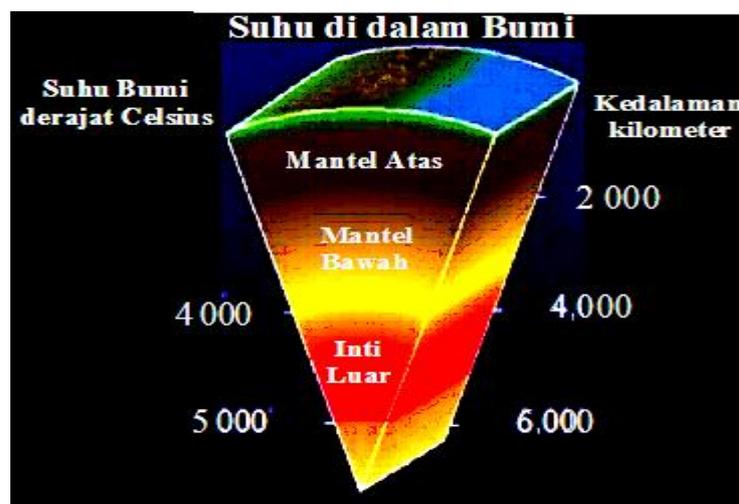
energi bumi (*earth energy*), (4) energi tekanan bumi (*geopresure energy*), dan (5) energi hidrotermal (*hydrothermal energy*).

Energi magma sebenarnya memiliki kandungan potensi energi panas yang sangat tinggi. Magma adalah cairan silikat pijar bersuhu antara 9000oC sampai dengan 14000°C yang terdapat di dalam bumi di bawah tubuh gunungapi (dapat dilihat pada Gambar 3). Sebenarnya energi magma ini sangat melimpah di Indonesia karena memiliki ratusan gunung api aktif. Namun demikian energi panas bumi dari energi magma ini belum dibahas dalam buku ini.

Energi panas batuan kering (*hot dry rock energy*), adalah energi dari batuan panas, yang berasal dari magma yang sudah membeku. Jenis energi ini juga berasal dari gunung api yang sedang tidak aktif (bisa gunung api Tipe B maupun Tipe C). Tipe gunung api dikelompokkan menjadi tiga yaitu Tipe A, B dan C. Gunung api Tipe A adalah gunung api yang pernah mengalami erupsi magmatik sekurang kurangnya satu kali sesudah tahun 1600. Gunung api Tipe B gunung api yang sesudah tahun 1600 belum lagi mengalami erupsi magmatic, namun masih memperlihatkan gejala kegiatan seperti kegiatan solfatara. Gunungapi Tipe C adalah gunung api yang erupsinya tidak diketahui dalam sejarah, tetapi masih jelas bahwa gunung tersebut merupakan produk gunung api dan masih terdapat tanda kegiatan masa lampau berupa lapangan solfatara/fumarola pada tingkat lemah tingkat lemah.

Energi bumi (*earth energy*), ini juga merupakan energi panas bumi akibat perbedaan suhu di permukaan bumi dan di dalam bumi (lihat Gambar 4). Adanya perbedaan suhu tersebut berarti ada perbedaan kandungan panas yang dapat dimanfaatkan menjadi energi. Kondisi seperti inilah yang disebut energi panas bumi dari energi bumi.

Energi tekanan bumi (*geopresure energy*), adalah energi yang dapat diperoleh dari perubahan tekanan di dalam bumi. Tekanan di dalam bumi berubah sesuai dengan berubahnya kedalaman. Menurut Shearer (1999) menerangkan bahwa perubahan tekanan pada setiap kedalaman bumi diuraikan sebagai berikut: (1) kerak bumi pada kedalaman 0-24 km memiliki tekanan sebesar 0-0,6 GPa (Giga Pascal), (2) mantel atas pada kedalaman 24-400 km memiliki tekanan sebesar 0,6-13,4 GPa, (3) zona transisi pada kedalaman 400-670 km memiliki tekanan sebesar 13,4-23,8 GPa, (4) mantel bawah pada kedalaman 670-2893 km memiliki tekanan sebesar 23,8-135,8 GPa, (5) Inti luar pada kedalaman 2891-5150 km memiliki tekanan sebesar 135.8-328,9 GPa, dan inti dalam pada kedalaman 5150-6371 km memiliki tekanan sebesar 328,9-363,9 GPa.



Gambar 4. Gambaran kondisi perubahan suhu di dalam bumi, dimana suhu permukaan bumi berkisar antara 20°C s.d. 25°C, (modifikasi setelah Kagel, dkk. 2007).

Energi hidrotermal (*hydrothermal energy*). Energi panas bumi, yang berupa energi panas yang tersimpan di dalam fluida dan batuan di bawah permukaan bumi. Pada kondisi geologi

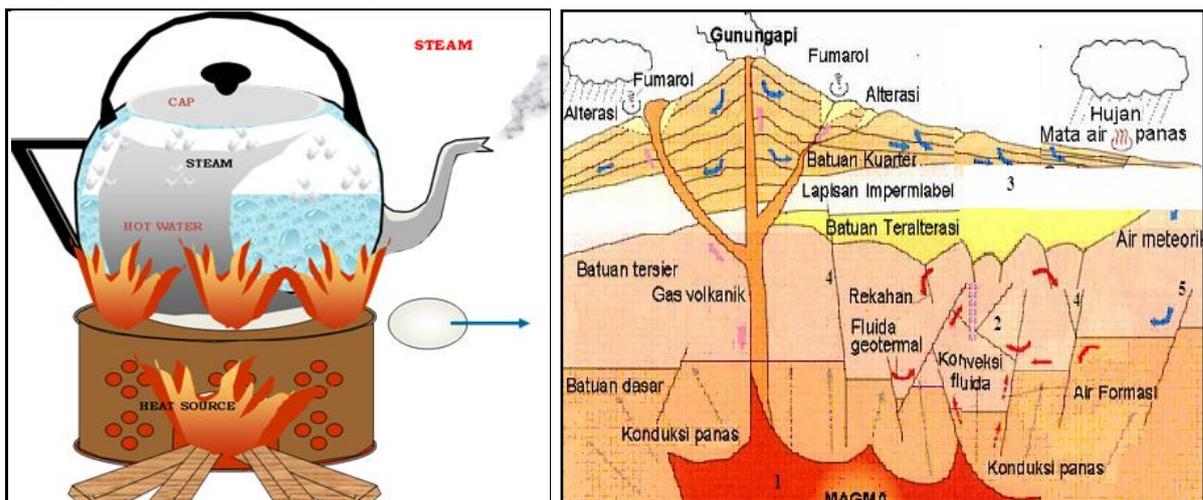
tertentu, energi panas bumi dapat tersimpan dalam reservoir (biasanya pada kedalaman < 3 km) terletak dalam cekungan sedimen atau berada di sepanjang zona sesar yang terjadi sirkulasi air. Sirkulasi tersebut bisa berasal dari air tanah, air hujan (meteoric) atau air dari sistem magmatic. Energi panas bumi jenis hidrotermal ini biasanya berhubungan dengan aktivitas tektonik muda dan aktivitas gunung api.

Dari kelima sumber energi tersebut, akhirnya yang paling berkembang dan produktif adalah sumber energi hidrotermal (hydrothermal energy). Karena sumber energi panas bumi, yang lain belum begitu ekonomis dan tidak banyak dieksploitasi, sehingga pada umumnya yang dikenal sebagai energi panas bumi adalah energi hidrotermal. Padahal energi panas bumi hidrotermal hanyalah salah satu dari beberapa jenis energi panas bumi tersebut.

Energi panas bumi telah dimanfaatkan untuk pembangkit listrik di Italia sejak tahun 1913, dan di New Zealand sejak tahun 1958. Pemanfaatan energi panas bumi untuk sektor non-listrik (direct use) telah berlangsung di Iceland sekitar 70 tahun. Dengan meningkatnya kebutuhan energi dan harga minyak, telah memacu negara-negara, di dunia ini untuk memanfaatkan energi panas bumi dalam rangka mengurangi ketergantungan pada energi fosil. Saat ini energi panas bumi telah dimanfaatkan untuk pembangkit listrik di banyak negara, termasuk Indonesia. Disamping itu fluida panas bumi juga dimanfaatkan untuk sektor non-listrik di sekitar 72 negara, antara lain untuk pemanasan ruangan, pemanasan air, pemanasan rumah kaca, pengeringan hasil produksi pertanian, pemanasan tanah, pengeringan kayu, kertas, penghangat ruangan dan sumber panas lain.

2.2. Sistem Panas Bumi

Sistem panas bumi tersusun oleh beberapa parameter kebumihan seperti sumber panas, reservoir, batuan penutup, sumber fluida dan siklus hidrologi, yang diperlihatkan Gambar 5. Air hujan (rain water) akan merembes ke dalam tanah melalui saluran pori-pori atau rongga-rongga di antara butir-butir batuan, sehingga air dengan leluasa menerobos turun ke batuan panas (hot rock). Air tersebut terakumulasi dan terpanaskan oleh batuan panas (hot rock), akibatnya temperatur air meningkat, volume bertambah dan tekanan menjadi naik. Tekanan yang terus meningkat menyebabkan air panas naik ke atas melalui celah, retakan dan pori-pori yang berhubungan di dalam permukaan.



Gambar 5. Sistem panas bumi secara umum. (1) sumber panas, (2) reservoir, (3) lapisan penutup, (4) patahan, (5) daerah resapan (recharge area) (modifikasi setelah dari google geothermal, 2010).

2.3. Model Sistem Panas Bumi

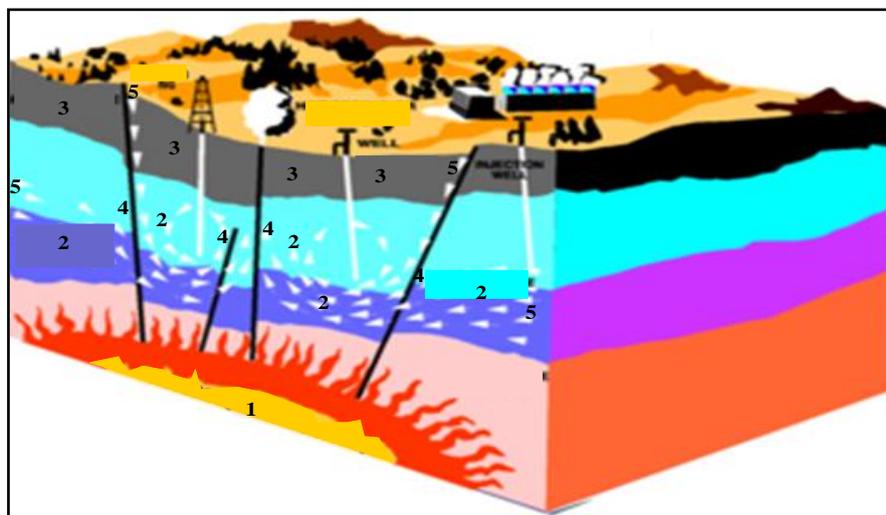
Sumber panas bumi berasal dari distribusi suhu dan energi panas di bawah permukaan bumi. Suhu di permukaan ditentukan oleh konduksi panas melalui batuan padat dan konveksi di dalam sirkulasi fluida. Suhu bumi bertambah besar secara konstan selaras dengan

bertambahnya kedalaman posisi di bawah permukaan bumi. Perubahan suhu bumi fungsi kedalaman tersebut, lazim disebut ”*gradient geothermal*”. Pada kedalaman tertentu, suhu bumi menjadi sangat tinggi, disebabkan oleh tumbukan lempeng (misalnya tumbukan antara kerak samudra dengan kerak benua). Peristiwa ini disebut sebagai proses subduksi.

Pada kondisi tertentu (tekanan (P) dan suhu (T) yang sangat tinggi) batuan padat akan menjadi magma cair. Dengan adanya suatu kondisi geologi tertentu, maka magma cair akan menerobos ke permukaan dan membentuk intrusi batuan beku atau kegiatan gunung api.

Lapisan litosfera (*lithosphere*) yang memiliki ketebalan yang tidak sama di setiap tempat, di bawah benua memiliki ketebalan 100 km dan di bawah samudera memiliki ketebalan sekitar 50 km (Stacey, 1977). Lapisan di bawah litosfera adalah astenosfera (*asthenosphere*) merupakan lapisan plastis yang mencapai kedalaman 500 km di dalam selubung. Tumbukan kerak benua dan kerak samudera menyebabkan litosfera akan menyusup masuk ke astenosfer yang bersuhu tinggi, sehingga dapat meleburkan kerak samudera yang berada di atas litosfera. Hasil peleburan kerak samudera akan menghasilkan magma (Gambar 2).

Magma merupakan lelehan material yang bercampur mineral-mineral dan gas-gas tertentu yang terjadi ketika suhu meningkat cukup tinggi. Ketika magma mencapai permukaan bumi melalui pipa-pipa gunung api, maka hancuran batuan, mineral dan gas akan keluar sebagai produk erupsi. Magma yang keluar dan meleleh di permukaan bumi disebut lava. Lava tersebut akan mengalami proses pendinginan dengan cepat di permukaan bumi, sehingga membentuk kerak batuan di permukaan. Sedangkan magma yang berada di bawah permukaan akan tetap cair dan panas, lihat Gambar 3. Magma yang berada di dalam bumi, jika tidak memiliki tekanan yang cukup untuk menerobos ke luar, maka magma tersebut akan tetap tertahan di bawah permukaan. Magma yang terperangkap di bawah permukaan ini akan mengalami pendinginan dengan lambat dan membeku sebagai magma dingin. Magma dingin tersebut dapat berfungsi sebagai sumber panas pada sistem bumi jenis hidrotermal (Skinner, 1989).



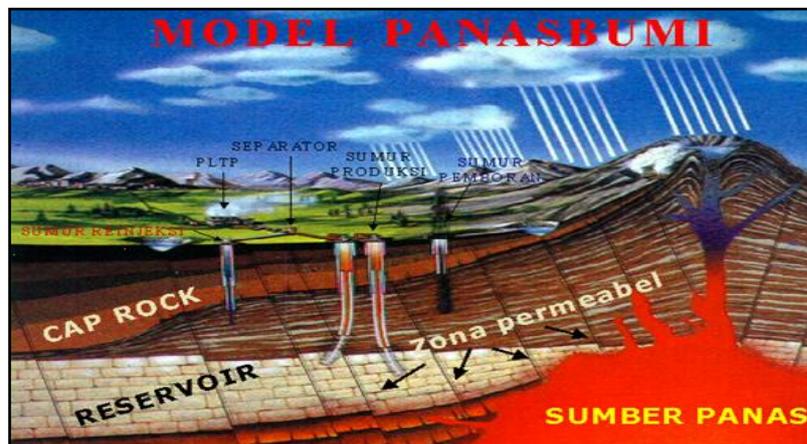
Gambar 6. Model umum sistem panas bumi. (1) sumber panas, (2) reservoir, (3) lapisan penutup, (4) patahan, (5) daerah resapan (*recharge area*) (*google geothermal*, 2010).

Sistem panasbumi yang diperlihatkan pada Gambar 6, memiliki beberapa parameter utama seperti sumber panas “1”, reservoir “2”, batuan penutup “3”, saluran permeable seperti patahan “4”, sumber fluida dan siklus hidrologi “5”. Air hujan (*rain water*) merembes ke dalam tanah melalui saluran pori-pori atau rongga-rongga di antara butir-butir batuan, sehingga air dengan leluasa menerobos turun ke batuan panas (*hot rock*). Air tersebut terakumulasi dan terpanaskan oleh batuan panas (*hot rock*), akibatnya suhu air meningkat, volume bertambah dan tekanan menjadi tinggi. Tekanan yang tinggi menyebabkan air panas

beserta mineral yang terlarut di dalamnya, naik ke permukaan melalui celah, retakan dan pori-pori yang berhubungan. Air dan mineral/material yang terlarut di dalam air muncul ke permukaan sebagai manifestasi proses sistem panas bumi.

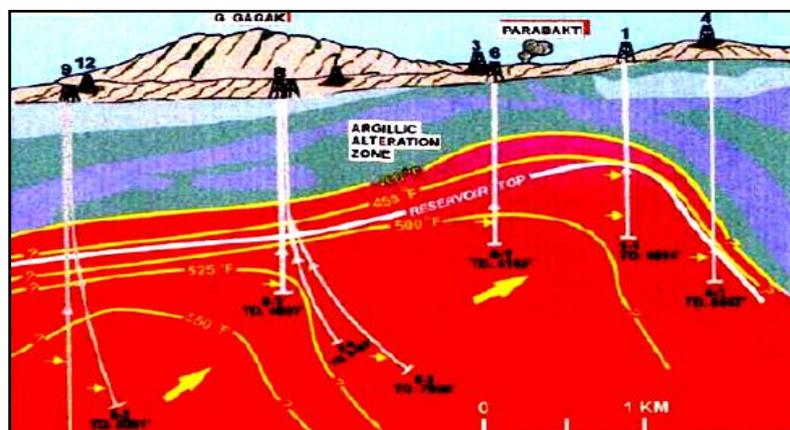
Suatu sistem panas bumi akan sempurna jika memenuhi persyaratan berikut:

1. Memiliki sumber panas (*heat source*) berupa batuan plutonik, magma yang telah dingin.
2. Memiliki batuan berongga-rongga (*porous rocks*) atau reservoir (*reservoir*) tempat air panas atau uap panas terjebak di dalamnya.
3. Terdapat struktur geologi (patahan, perlipatan, *collapse*, rekahan dan ketakselarasan), yang merupakan sistem lolos air (*permeable*).
4. Memiliki lapisan penutup (*cap rocks*), berupa batuan kedap air (*impermeable*), biasanya terdiri dari batuan lempung.
5. Terdapat daerah resapan air (*recharge area*) dan siklus hidrologi, aliran air di bawah permukaan yang cukup untuk pengisian cadangan air reservoir.

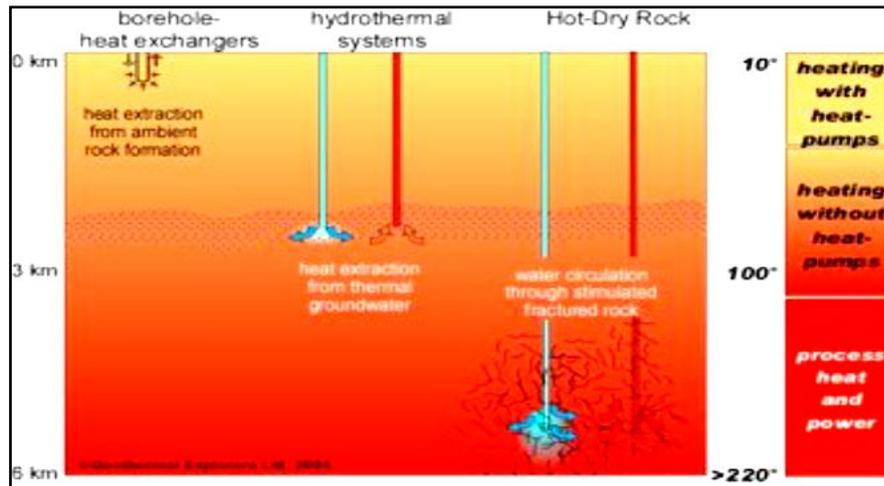


Gambar 7. Model sistem panas bumi Ulubelu, Kab. Tanggamus, Lampung (PGE, 2008).

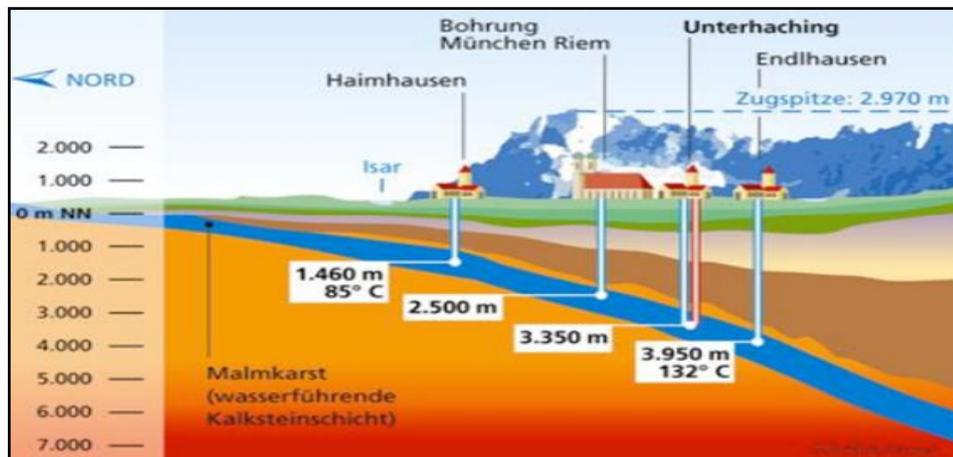
Gambar 6 menunjukkan model sistem panas bumi secara umum, yang memenuhi lima syarat terbentuknya sistem panas bumi, Gambar 7 adalah model sistem panas bumi lapangan Ulubelu (di Kabupaten Tanggamus Provinsi Lampung), Gambar 8 adalah model sistem panas bumi lapangan Gunung Salak (di Kabupaten Sukabumi dan Bogor).



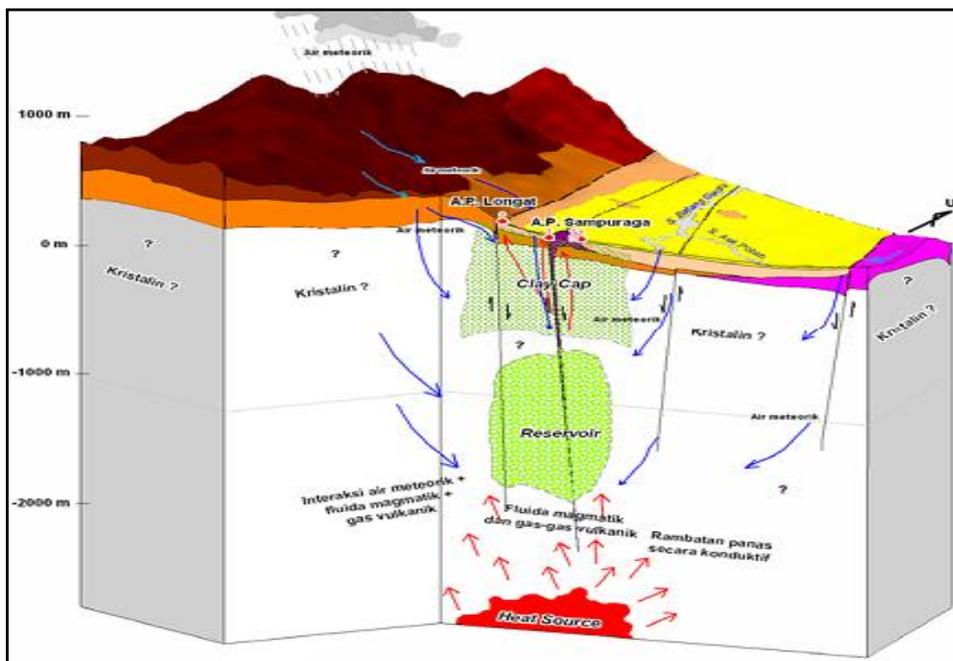
Gambar 8. Model sistem panas bumi di lapangan Gunung Salak (Gunung Salak *Geothermal Project Guide Book*, 1996), dari Teknik Panasbumi, Nenny Miryani Saptadji.



Gambar 9. Model pemanfaatan energi panas bumi di Italy (Jones & Ligtenberg, 2008).



Gambar 10. Model system akuifer air panas di Jerman (Jones & Ligtenberg, 2008).



Gambar 11. Model Tentatif Sistem Panas Bumi Daerah Panas Bumi Sampuraga, dari Sugianto, dkk. (2007).

III. ESTIMASI SUMBER DAYA, CADANGAN DAN POTENSI ENERGI LISTRIK LAPANGAN PANAS BUMI

3.1. Permasalahan dalam Menentukan Sumber Daya, Cadangan dan Potensi

Masalah utama dalam menentukan besarnya sumberdaya (*resources*), cadangan dan potensi listrik panas bumi adalah bahwa data tidak seluruhnya tersedia. Ketersediaan data tergantung pada tingkatan pelaksanaan penelitian yang telah dilakukan di daerah tersebut. Seperti dibahas pada beberapa paragraph sebelumnya, kegiatan eksplorasi dari tahap ke tahap menghasilkan tingkatan estimasi potensi energi panas bumi. Semakin lengkap data yang diperoteh maka semakin akurat hasil estimasi potensi energi suatu prospek panas bumi.

Berdasarkan pada kelengkapan data hasil penelitian, tingkat klasifikasi estimasi potensi dapat dikelompokkan sebagai berikut: (1) Klas sumber daya spekulatif, (2) Klas sumber daya hipotesis, (3) Klas Cadangan terduga (*possible*), (4) Klas Cadangan mungkin (*probable*), (5) Cadangan terbukti (*proven*).

3.1.1 Ketersediaan data pada eksplorasi awal

Disamping data hasil penelitian, banyak juga parameter yang tidak diketahui dengan pasti sehingga biasanya diasumsikan. Pada tahap eksplorasi awal penelitian biasanya dilakukan dengan menggunakan peralatan yang mudah dibawa, sehingga datanya masih sangat terbatas. Dengan demikian besarnya sumber daya masih sulit untuk diperkirakan. Karena data sangat terbatas maka besarnya potensi listrik belum dapat ditentukan menggunakan metoda perhitungan yang pasti. Oleh karena itu biasanya para ahli panas bumi menentukan potensi sumber daya panasbumi ke dalam kelas sumber daya spekulatif. Karena sifatnya masih spekutdif maka tingkat kepastiannya masih rendah.

3.1.2 Data manifestasi permukaan

Manifestasi panas bumi di permukaan sangat penting untuk mendapatkan perkiraan awal. Data hasil analisis air yang diambil dari manifestasi permukaan, sangat berguna untuk memperkirakan asal sumber air, jenis reservoir, suhu di bawah permukaan, karakter dan jenis fluida reservoir. Pengukuran suhu tanah dekat permukaan dapat digunakan untuk menentukan jumlah aliran panas yang terjadi secara konduksi (H) dalam (W), yaitu dengan menggunakan persamaan berikut:

$$H = -\lambda A (dT/dz) \dots\dots\dots (1)$$

Dimana, λ adalah daya hantar panas batuan ($W m^{-1} ^\circ C^{-1}$), A adalah luas bidang permukaan (m^2), (dT/dz) adalah gradient suhu ($^\circ C m^{-1}$).

Besarnya aliran panas secara konveksi (H_v) dalam (W), ke permukaan dapat dihitung berdasarkan jumlah aliran massa dan suhu fluida.

$$H_v = h_a q_{ma} + h_u q_{mu} \dots\dots\dots (2)$$

dimana: H_v adalah total laju aliran panas ($kJ s^{-1}$ atau kW), h_a adalah entalpi air ($kJ kg^{-1}$), h_u adalah entalpi uap ($kJ kg^{-1}$), q_{ma} adalah laju alir massa air ($kg s^{-1}$), q_{mu} adalah laju alir massa uap ($kg s^{-1}$).

Total laju aliran panas ke permukaan biasa dinyatakan sebagai panas yang hilang (*heat losses*), adalah jumlah aliran panas ke permukaan yang terjadi secara konduksi dan konveksi.

Berdasarkan azas kesetimbangan panas dan massa, diperkirakan panas yang hilang ke permukaan sebanding dengan panas yang masuk pada sistem. Sehingga jumlah panas yang hilang ke permukaan sering digunakan sebagai perkiraan awal dalam menentukan besarnya sumber daya. Tabel 1 menggambarkan hasil perhitungan panas yang hilang ke permukaan melalui manifestasi panas bumi di permukaan. Total panas yang hilang ke permukaan adalah 121,6 MW. Hal dapat digunakan untuk memprediksi bahwa minimal ada energi panas yang masuk ke dalam reservoir sebesar 121,6 MW secara terus menerus.

Perkiraan besarnya panas yang hilang ke permukaan tidak hanya berguna untuk menentukan besarnya sumber daya spekulatif, namun diperlukan sebagai input pembuatan model reservoir secara simulasi, yaitu untuk membuat perkiraan kelakuan reservoir bila diproduksi selama kurun waktu tertentu (misalnya selama 25 atau 30 tahun).

Tabel 1. Perkiraan panas yang hilang melalui manifestasi permukaan prospek panas bumi Kamojang, dimodifikasi dari Saptadji (2010).

No.	JENIS MANIFESTASI	POTENSI ENERGI PANAS (MW)
1.	Mata air panas/hangat	17,2
2.	Fumarol	20,6
3.	Telaga Kawah Manuk	22,1
4.	Kawah Pengasahan	4,2
5.	Mata air Cipangasahan	10,2
6.	Mata air sejauh 2,5 km selatan Kawah Kamojang	0,2
7.	Penguapan telaga dan kolam air panas/hangat	44,2
8.	Telaga beruap	2,9
	Total	121,6

3.2. Penentuan Sumber Daya, Cadangan dan Potensi

Penentuan potensi suatu prospek panas bumi biasanya dimulai dari pendekatan penentuan besarnya sumber daya, kemudian pada tahap lanjut baru bisa ditentukan besarnya cadangan.

Besarnya sumber daya dapat ditentukan pada eksplorasi pendahuluan dengan cara spekulasi berdasarkan informasi: (1) data sebaran manifestasi, (2) data geologi regional, (3) suhu fluida di permukaan dan (4) estimasi suhu bawah permukaan. Besarnya sumber daya seperti ini disebut "sumber daya spekulatif". Potensi spekulatif memiliki tingkat kepastian paling rendah dan dihitung hanya berdasarkan manifestasi permukaan dan tanda-tanda yang dijumpai dalam tinjau lapangan. Luas reservar dihitung dari penyebaran manifestasi dan batasan geologi, sedangkan suhu dihitung dengan geotermometer. Daya per satuan luas dihitung dengan asumsi berdasarkan suhu reservoir (lihat Tabel 2). Perhitungan sumber daya spekulatif dirumuskan sebagai berikut:

$$E_{sd} = A \times Q_e \quad \dots\dots\dots (3)$$

dimana, E_{sd} adalah besarnya sumber daya (MW_e), A adalah luas daerah prospek panas bumi (km^2), Q_e adalah daya listrik per satuan luas (MW_e/km^2).

Tabel 2. Asumsi daya per satuan luas reservoir panas bumi (SNI 136171, 1999)

JENIS RESERVOAR	SUHU RESERVOAR ($^{\circ}C$)	DAYA (Q_e) PER SATUAN LUAS (MW_e/km^2)
Suhu rendah	<125	10
Suhu sedang	125 – 225	12,5
Suhu tinggi	>225	15

(Suharno, 2006)

Tahap berikutnya adalah penentuan sumberdaya hipotesis. Pada tahap ini sudah dilakukan eksplorasi pendahuluan tahap lanjut. Data yang dimiliki ialah: (1) peta geologi, (2) peta geofisika, (3) peta geokimia, (4) tipe fluida, (5) peta geohidrologi, (6) model sistem panas bumi. Potensi yang dapat ditentukan ialah sumber daya secara hipotesis (biasa disebut "sumber daya hipotesis"). Pada tahap ini perhitungan dilakukan berdasarkan Persamaan (1).

Penelitian lebih lanjut adalah eksplorasi rinci. Metode yang digunakan adalah penelitian geologi, geokimi (permukaan dan bawah permukaan), geofisika (pemetaan, pendugaan, pemboran, logging, landaian suhu dan tekanan). Output hasil penelitian meliputi: (1) peta geologi rinci, (2) peta zona alterasi, (3) peta struktur geologi, (4) peta identifikasi peluang bahaya geologi, (5) peta anomaly unsure-unsur kimia, (6) model hidrologi, (7) peta anomali dan penampang tegak pendugaan sifat fisis batuan, (8) sifat fisis batuan dan fluida sumur, (9) landaian suhu dan tekanan, (10) sumur landaian suhu & tekanan, (11) model panas bumi sementara, dan (12) saran lokasi titik bor. Target tahap ini adalah potensi cadangan terduga (*possible reserves*), dapat dihitung,

$$E_{cd} = 0,2317 A H_t (T - T_{cut-off}) \dots\dots\dots (4)$$

dimana, E_{cd} adalah besarnya cadangan terduga (MW_e), A adalah luas daerah prospek panas bumi (km^2), H_t adalah ketebalan reservoir (km), dihitung berdasarkan data geofisika dan data sumur. T adalah suhu reservoir ($^{\circ}C$), $T_{cut-off}$ adalah suhu *cut-off* ($^{\circ}C$) diambil sesuai suhu reservoir berdasarkan Tabel 3.

Tabel 3. Suhu *cut-off* reservoir panasbumi (SNI 136171,1999)

Jenis Reservoir	Suhu Reservoir ($^{\circ}C$)	Suhu <i>Cut-off</i> ($^{\circ}C$)	Konversi Energi (%)	Lain-lain
Suhu rendah	<125	90	10	$\Phi = 10 \%$
Suhu sedang	125 – 225	120	10	$T = 30 \text{ th}$
Suhu tinggi	>225	180	10	$S_L = 100 \%$

(Suharno, 2007)

Tahap berikutnya adalah pemboran eksplorasi dengan target dapat menentukan cadangan mungkin (*probable reserves*). Metode yang dilakukan adalah pengeboran eksplorasi & geologi, pengujian sumur (geokimia, geofisika), dengan out put sebagai berikut: (1) sumur eksplorasi, (2) model geologi bawah permukaan, (3) zona ubahan bawah permukaan, (4) sifat fisis dan kimia sumur, (5) data mineral hidrotermal, (6) data fluida inklusi (*fluids inclosions*) jika mungkin, (7) model panas bumi sementara, dan (8) potensi sumur eksplorasi. Masih dalam rangka menentukan cadangan mungkin (*probable reserves*). Dengan melakukan pra studi kelayakan dengan mengevaluasi potensi dengan beberapa output yang mendukung penentuan cadangan mungkin: (1) potensi cadangan mungkin, (2) klasifikasi pemanfaatan, (3) rencana pengembangan. Potensi cadangan mungkin dihitung dengan rnerasukan data satu sumur eksplorasi (discovery well). Perhitungan dapat dihitung menggunakan Persamaan (17).

Langkah terakhir adalah menentukan cadangan terbukti (*proven reserves*). Peneletian yang dilakukan adalah (1) pengeboran deliniasi dan (2) studi kelayakan. Pengeboran deliniasi ialah melakukan pengeboran eksplorasi tambahan dan pengujian sumur. Out put dalam tahap ini adalah: (1) sumur deliniasi, (2) model panas bumi, (3) potensi sumur, dan (4) karakteristik reservoir. Sedangkan penelitian tentang studi kelayakan melakukan evaluasi cadangan (simulasi), dan perancangan teknis, dengan output: (1) potensi cadangan terbukti, (2) rancangan sumur produksi & injeksi, (3) rancangan pemipaan, (4) rancangan sistem pembangkit listrik dan (5) kelayakan pengembangan. Potensi terbukti mempunyai tingkat kepastian yang paling tinggi dan dihitung dergan memafitkn'lata dari paling sedikit satu sumur eksplorasi (discovery well) dan dua sumur deleniasi. Perhitungan potensi terbukti menggunakan Persamaan (18).

Prosedur selanjutnya adalah mempersiapkan pemboran pengembangan. Metode yang dilakukan adalah: (1) pengeboran pengembangan, dan (2) pengujian sumur. Dalam tahap ini akan menghasilkan output: (1) Sumur pengembangan, (2) kapasitas produksi panas bumi (ton/jam).

Ada beberapa metode untuk menentukan besarnya sumber daya (*resources*), cadangan (*recoverable reserve*) dan potensi listrik lapangan panas bumi. Metode yang paling umum digunakan adalah metode perbandingan dan metode volumetrik.

3.3. Metode Perbandingan

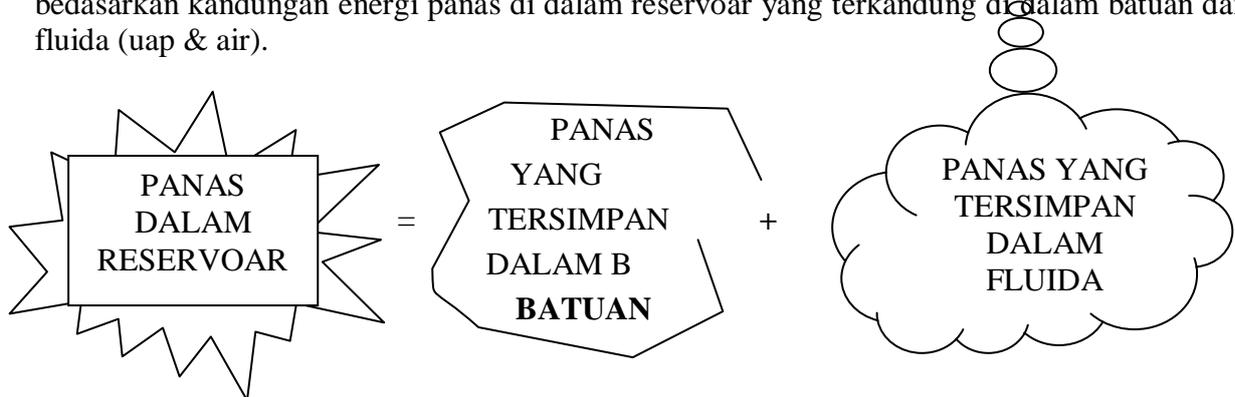
Metode perbandingan biasanya dipakai jika penelitian yang dilakukan baru sampai pada tahap tinjauan penyebaran manifestasi permukaan dan struktur geologi secara global (eksplorasi pendahuluan). Pada tahap ini belum ada data yang dapat digunakan untuk memperkirakan besarnya sumber daya dengan menggunakan metode lain (secara matematis atau numerik). Oleh karena itu potensi sumber daya panas bumi diperkirakan berdasarkan potensi lapangan lain yang memiliki kemiripan kondisi geologi dan manifestasinya.

Prinsip dasar metode perbandingan adalah menyetarakan besar potensi energi suatu lapangan panas bumi baru yang belum diketahui potensinya dengan lapangan lain yang telah diketahui potensinya dan memiliki kemiripan kondisi geologi dan manifestasinya.

Perkiraan dengan metode perbandingan, besarnya sumber daya lapangan panas bumi dapat dilakukan dengan menggunakan Rumus (3).

3.4. Metode Volumetrik

Metode volumetric adalah metode perhitungan berdasarkan volume reservoir prospek panas bumi untuk menentukan dengan perhitungan besarnya sumber daya panas bumi (*resources*), banyaknya energi panas bumi yang dapat dimanfaatkan (cadangan) dan besarnya energi listrik yang dapat dihasilkan (potensi tenaga listrik energi panas bumi). Perhitungan dilakukan berdasarkan kandungan energi panas di dalam reservoir yang terkandung di dalam batuan dan fluida (uap & air).



Gambar 12. Gambaran panas dalam reservoir yang terdiri dari panas yang tersimpan dalam batuan ditambah dengan panas yang tersimpan dalam fluida.

Panas yang tersimpan dalam suatu benda adalah (Q) dalam kJ, dapat ditentukan berdasarkan persamaan:

$$Q = m c T \quad \dots\dots\dots (5)$$

dengan, m adalah massa (kg), c adalah kapasitas panas ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), dan T adalah suhu ($^\circ\text{C}$).

Berdasarkan Gambar 12, jika suatu reservoir memiliki volume (*bulk volume*) (V dalam km^3), porositas (ϕ dalam %), dan densitas batuan (σ_b dalam kg m^{-3}), maka massa batuan dalam reservoir dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$m_b = V (1 - \phi) \sigma_b \quad \dots\dots\dots (6)$$

Persamaan (3) dapat dirubah menjadi,

$$m_b = A H_t (1 - \phi) \sigma_b \quad \dots\dots\dots (7)$$

dengan A adalah luas reservoir (km^2) dan H_t adalah ketebalan reservoir (km).

Jika batuan reservoir memiliki kapasitas panas c_b ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), maka panas yang tersimpan dalam batuan (Q_b dalam kJ) adalah:

$$Q_b = A H_t (1 - \phi) \sigma_b c_b T \quad \dots\dots\dots (8)$$

Panas yang tersimpan di dalam fluida (di dalam air dan di dalam uap). Jika m_a adalah massa air (kg m^{-3}), dan m_u adalah massa uap (kg m^{-3}), maka panas yang terkandung dalam fluida (Q_f dalam kJ) dapat dihitung dengan rumus:

$$Q_f = m_a u_a + m_u u_u \quad \dots\dots\dots (9)$$

dengan u_a adalah energy dalam air (kJ kg^{-1}), u_u adalah energy dalam uap (kJ kg^{-1}).

Jika S_a adalah saturasi air (%), S_u adalah saturasi uap (%), (σ_a) adalah densitas air (kg m^{-3}), dan (σ_u) adalah densitas uap (kg m^{-3}), maka,

$$m_a = V \phi S_a \sigma_a \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$m_u = V \phi S_u \sigma_u \quad \dots\dots\dots (11)$$

dengan A adalah luas reservoir (km^2), dan H_t adalah ketebalan reservoir (km), Persamaan (10) dan (11) dapat dirubah menjadi,

$$m_a = A H_t \phi S_a \sigma_a \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$m_u = A H_t \phi S_u \sigma_u \quad \dots\dots\dots (13)$$

dengan mensubsitusikan Persamaan (12) dan (13) ke dalam Persamaan (9) maka panas yang terkandung dalam fluida (dalam air dan uap) (Q_f) adalah:

$$Q_f = A H_t \phi S_a \sigma_a u_a + A H_t \phi S_u \sigma_u u_u \quad \dots\dots\dots (14)$$

Persamaan (10) dapat disederhanakan menjadi,

$$Q_f = A H_t \phi (S_a \sigma_a u_a + S_u \sigma_u u_u) \quad \dots\dots\dots (15)$$

Berdasarkan Persamaan (9) dan (16), maka perhitungan energi panas (E_e), satuan (kJ), di dalam reservoir (dalam batuan dan fluida) adalah:

$$E_e = A H_t (1 - \phi) \sigma_b c_b T + A H_t \phi (S_a \sigma_a u_a + S_u \sigma_u u_u) \quad \dots\dots\dots (16)$$

Perhitungan besarnya energy panas yang dapat dimanfaatkan (cadangan) yang dapat diubah menjadi energy listrik (potensial listrik) dapat dilakukan dengan langkah perhitungan berikut:

- (1) Menghitung cadangan sebelum diproduksi (cadangan mula-mula), E_{em} (kJ), dengan waktu mula-mula (T_m)

$$E_{em} = A H_t \{ (1 - \phi) \sigma_b c_b T_m + \phi (S_a \sigma_a u_a + S_u \sigma_u u_u)_m \} \quad \dots\dots\dots (17)$$

- (2) Menghitung cadangan energy panas bumi berakhir (cadangan bisa diproduksi terakhir), E_{et} (kJ), waktu akhir produksi (T_t , biasanya pada suhu 180°C),

$$E_{et} = A H_t \{ (1 - \phi) \sigma_b c_b T_t + \phi (S_a \sigma_a u_a + S_u \sigma_u u_u)_t \} \quad \dots\dots\dots (18)$$

- (3) Menghitung energi maksimum yang dapat dimanfaatkan (E_{th} , satuan (kJ),

$$E_{th} = E_{em} - E_{et} \quad \dots\dots\dots (19)$$

- (4) Menghitung energi panas bumi riil yang dapat dimanfaatkan (E_{er}) satuan (kJ), dengan R_f adalah faktor perolehan, umumnya diasumsikan (25%),

$$E_{er} = R_f E_{th} \quad \dots\dots\dots (20)$$

- (5) Menghitung besarnya cadangan energi panas bumi yang dapat dimanfaatkan dalam kurun waktu tertentu (t sekitar 25 s.d. 30 tahun), (E_{termal}), satuan ($\text{MW}_{\text{termal}}$; mega watt panas),

$$E_{\text{termal}} = E_{er} / (3600.24.365.t) \quad \dots\dots\dots (21)$$

- (6) Menghitung besar potensi listrik yang dapat dibangkitkan untuk kurun waktu t tahun (E_l) satuan (MW_e , dibaca; mega watt listrik), dengan η adalah factor konfersi listrik, umumnya diasumsikan (10%),

$$E_l = \eta E_{\text{termal}} = \eta E_{er} / (3600.24.365.t) \quad \dots\dots\dots (22)$$

IV. PENENTUAN DAYA LISTRIK

Beberapa macam energi pembangkit tenaga listrik. Pada prinsipnya adalah fluida yang dialirkan melalui turbin akan menimbulkan energi mekanik berupa gerakan turbin yang dapat memutar generator yang dapat menimbulkan energi listrik. Fluida yang bisa digunakan seperti: (1) angin adalah udara yang mengalir, (2) yang mengalir deras, (3) uap air. Pembangkit listrik tenaga uap, fluida penggerak turbinnya adalah uap yang diperoleh dari hasil penguapan air yang dihasilkan oleh mesin pendidih (mesin *boiler*). Uap air ini hasil penguapan dari air yang dididihkan di dekat permukaan.

Beda halnya dengan Pembangkit Listrik Tenaga Panasbumi (PLTP). Pada prinsipnya sama seperti Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), hanya saja pada PLTP, uap berasal dari reservoir panasbumi. Jika fluida di kepala sumur berupa uap, maka uap tersebut dapat langsung dialirkan ke turbin, sehingga memutar generator yang dapat menghasilkan energi listrik. Jika fluida panas bumi yang keluar dari kepala sumur berupa campuran uap dan air (fluida dua fasa), maka uap dan air tersebut harus dipisahkan terlebih dahulu. Prosesnya yaitu dengan cara melewati fluida ke dalam separator, sehingga fasa uap akan terpisah dari fasa cairnya. Fraksi uap yang dihasilkan oleh separator inilah yang dialirkan ke turbin.

Beberapa sistem pembangkit listrik energi fluida panas bumi yang telah diterapkan di lapangan, antara lain: (1) *Hybrid/fossil-geothermal conversion system*, (2) *direct drys steam*, (3) *single flash stearn*, (4) *double flash steam*, (5) *multi flash steam*, (6) *combined cycle*, (7) *separated steam*.

Pada bagian ini akan dibahas beberapa metoda yang digunakan untuk menentukan besarnya daya listrik yang dapat dibangkitkan oleh turbin uap. Metoda yang digunakan sama dengan metode penentuan konsumsi uap kapasitas PLTP yang telah diketahui/ditentukan.

4.1 Prinsip-prinsip Termodinamika

4.1.1. Hukum I Termodinamika

Pemindahan panas dan kerja usaha, bisa berbentuk dua macam yaitu: (1) penambahan energi kepada suatu system, sebaliknya (2) pengurangan energi pada suatu system. Jika pemindahan energi selesai berarti suatu sistem tersebut telah mengalami perubahan energi. Sistem adalah keadaan dimana suatu proses terjadi, sedangkan lingkungan adalah sesuatu yang berada di luar system. Hukum ini berlaku tidak hanya pada sistem saja tetapi juga pada lingkungan. Dalam bentuk dasar, dapat ditulis sebagai,

$$\text{Perubahan energi sistem} + \text{perubahan energi lingkungan} = 0 \quad \dots\dots\dots (23)$$

Jika antara sistem dan lingkungan tidak terjadi perpindahan massa maka sistem dikatakan tertutup dan massa tetap. Kondisi sistem seperti ini, semua energi yang

berpindah antara sistem dan lingkungan berbentuk panas dan kerja sehingga persamaan (23) dapat dijabarkan menjadi,

$$\text{Perubahan energi lingkungan} = \pm Q \pm W \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$\text{Perubahan energi sistem} = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p \quad \dots\dots\dots (25)$$

Jika panas yang masuk ke sistem dan kerja yang dilakukan sistem bernilai positif, berarti perubahan energi total sistem sama dengan panas yang ditambahkan pada sistem dikurangi dengan kerja yang dilakukan oleh system,

$$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q - W \quad \dots\dots\dots (26)$$

Persamaan di atas berlaku untuk perubalan yang terjadi pada sistem tertutup, Sistem tertutup adalah system yang menjalankan proses dimana tidak ada perubahan energi potensial dan kinetik, sehingga persamaan (27) dapat ditulis menjadi,

$$\Delta U = Q - W \quad \dots\dots\dots (27)$$

4.1.2. Proses Aliran Steady State

Pada proses dengan massa tetap, dimana hanya terjadi perubahan energi-dalam saja maka berlaku Persamaan (28). Pada proses-proses yang terjadi pada industri yang biasanya melibatkan aliran tetap melalui peralatan-peralatan, maka Hukum Pertama Termodinamika perlu penjabaran yang lebih umum. Keadaan tetap berarti bahwa kondisi pada semua titik dalam peralatan tetap terhadap waktu. Sehingga persamaan (27) menjadi,

$$\Delta H + \frac{1}{2} \Delta V^2 + g \Delta z = Q - W \quad \dots\dots\dots (28)$$

Pada penerapannya secara termodinamika, energi potensial dan energi kinetik terlalu kecil jika dibandingkan dengan elemen-elemen lain dalam system peralatan, sehingga dapat diabaikan. Selain itu, pada turbin semua perpindahan panas diabaikan sehingga Persamaan (29) bisa ditulis menjadi Persamaan (30). Jika kerja turbin diberi tanda minus, adalah massa yang mengalir. Dengan memasukkan variabel massa (m) maka Persamaan (30) dapat ditulis menjadi Persamaan (31). Persamaan (31) ini digunakan untuk menghitung daya turbin.

$$\Delta H = - W \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$W = m (h_1 - h_2) \quad \dots\dots\dots (30)$$

dimana, W adalah kerja atau daya turbin (kW), m adalah massa (kg s^{-1}), h_1 adalah entalpi uap yang masuk ke turbin (kJ kg^{-1}), dan h_2 adalah entalpi uap yang keluar dari turbin (kJ kg^{-1}).

4.2 Siklus Uap Hasil Pemisahan

Seandainya fluida panas keluar dari kepala sumur (*well head*) sebagai campuran fluida dua fasa (uap dan air) maka harus dilakukan proses pemisahan, dngan cara melewatkan fluida ke dalam pemisah (*separator*), lihat Gambar 13, sehingga uap akan berpisah dengan air. Fraksi uap yang dihasilkan oleh pemisah dihitung sebagai daya turbin. Karena proses yang demikian itu maka sisten konversi energi ini biasa disebut “Siklus Uap”. Siklus ini banyak digunakan pada reservoir panas bumi dominasi air.

Pada titik 1 fluida panas bumi berupa campuran dua fasa. Sebelum memasuki turbin fluida menjalani proses isentalpik dari titik 1 ke titik 2. Pada kepala sumur diketahui laju alir massa fraksi-uap-fluida. Pada titik 2 fluida masuk ke separator, sehingga,

$$h_1 = h_{f1} + X_{wh} h_{fg} \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$h_2 = h_1 = h_{f2} + x_2 h_{fg2} \quad \dots\dots\dots (32)$$

Fraksi uap yang masuk ke separator, dapat dihitung dari Persamaan (33), dan fraksi airnya dibuang. Entalpi dan entropi fluida di dalam turbin, pada tekanan dan suhu inlet dapat dicari menggunakan tabel uap. Entropi pada titik 2 dan titik 3 (inlet dan outlet turbin) dianggap sama (proses yang terjadi di dalam turbin isentropik), sehingga,

$$S_2 = S_3 = S_{f3} + x_3 S_{fg3} \quad \dots\dots\dots (33)$$

maka fraksi uap yang keluar dari turbin dapat diketahui. Harga fraksi uap ini digunakan untuk menghitung entalpi outlet turbin,

$$h_3 = h_{f3} + x_3 h_{fg3} \quad \dots\dots\dots (34)$$

Maka daya turbin bisa dihitung dengan menggunakan Pesamaan (35),

$$W = \eta m x_2 (h_2 - h_3) \quad \dots\dots\dots (35)$$

4.3. Siklus Uap Kering

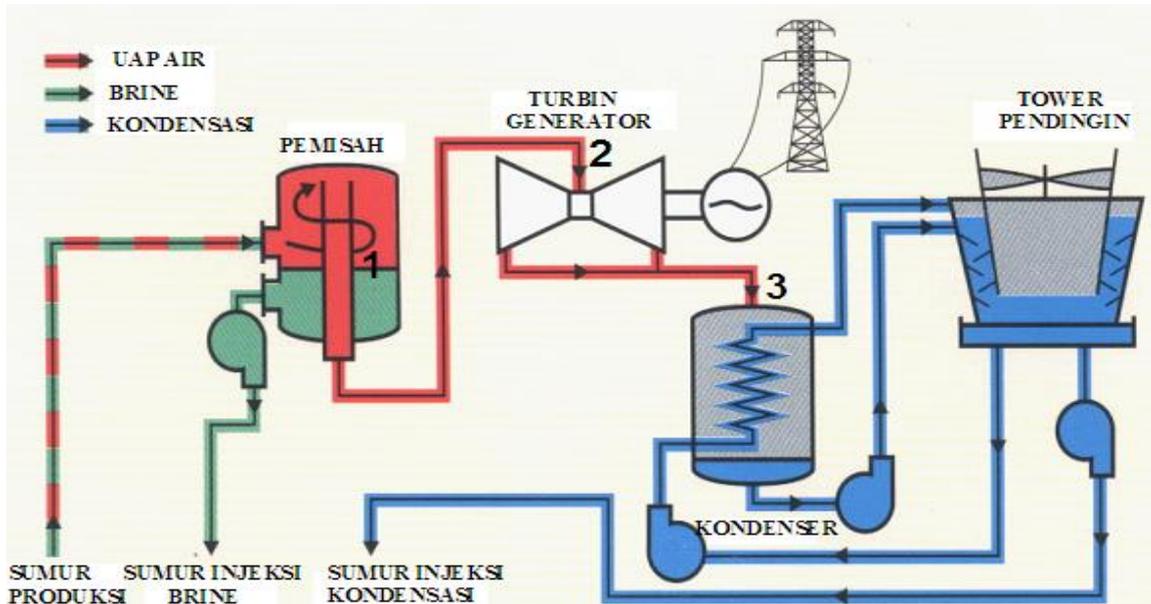
Sistem konversi fluida uap kering merupakan sistem konversi yang paling sederhana dan paling murah. Uap kering langsung dialirkan menuju turbin kemudian setelah dimanfaatkan uap dapat dibuang ke atmosfer atau dialirkan ke kondensor. Kerja yang dihasilkan oleh turbin pada sistem konversi uap kering dihitung menggunakan persamaan (31) .

Untuk siklus uap kering dari Gambar 13, titik 2 berupa uap, sedangkan pada titik 3 berupa uap dan air (fluida dua fasa). Dalam siklus uap kering, dianggap titik dua langsung dari kepala

sumur. Proses yang dilalui fluida dari titik 2 ke titik 3 dianggap proses isentropik yang berarti entropi pada titik 2 sama dengan entropi pada titik 3, sehingga,

$$S_2 = S_3 \quad \dots\dots\dots (36)$$

$$S_2 = S_{f3} + x_3 S_{fg3} \quad \dots\dots\dots (37)$$



Gambar 13. Skema Diagram Siklus Uap. Titik 1 terdiri dari uap dan air (dua fasa), memiliki fraksi uap x_1 . Titik 2 terdiri dari uap (satu fasa), dan titik 3 terdiri dari uap dan air (dua fasa).

Jika harga tekanan dan suhu diketahui (dibuat tetap), maka harga harga entropi dan entalpi bisa diperoleh dari tabel uap. Sehingga dari persamaan (38) dapat dicari harga fraksi uap (x) untuk kondisi tekanan atau suhu pada outlet turbin. Dengan memanfaatkan harga fraksi uap tersebut, diperoleh harga entalpi pada outlet turbin,

$$h_3 = h_{f3} + x_3 h_{fg3} \quad \dots\dots\dots (38)$$

Besarnya daya turbin dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (39)

$$W = \eta m (h_2 - h_3) \quad \dots\dots\dots (39)$$

dengan η adalah efisiensi turbin.

V. CONTOH HASIL RISET PANAS BUMI DI SUMATERA BARAT

5.1. Lapangan Panas Bumi Gunung Talang Kab. Solok Sumatera Barat

Prospek panasbumi Gunung Talang Sumatra Barat terletak di sekitar 100,6° BT; 1° LS, termasuk wilayah Kabupaten Solok, Provinsi Sumatra Barat (Gambar 14). Cadangan energi listrik suatu prospek panasbumi dapat ditentukan dengan cara: (1) menentukan suhu reservoir, (2) setelah reservoir diketahui tingkat suhunya maka cadangan energi listrik per satuan luas dapat diketahui, (3) menghitung luas manifestasi prospek panasbumi tersebut. Sehingga suhu reservoir dan luas daerah manifestasi perlu ditentukan terlebih dahulu. Penentuan suhu reservoir diperlukan perhitungan geotermometer berdasarkan data geokimia dan penentuan luas daerah manifestasi diperlukan data geofisika.

Data geokimia diperoleh akibat proses interaksi dominan antara air dan batuan mempengaruhi komposisi air pada kedalaman antara 1 s.d. 5 km. Geotermometer dapat didasarkan pada kelarutan zat larut (geotermometer silika) atau konsentrasi larutan mineral (seperti, Na-K-Ca, Na-K, K-Mg). Geotermometer silika cukup bagus, hanya memiliki kesalahan $\pm 2^\circ\text{C}$ dalam range suhu 20° s.d. 250° C, (Simmons, 1998),

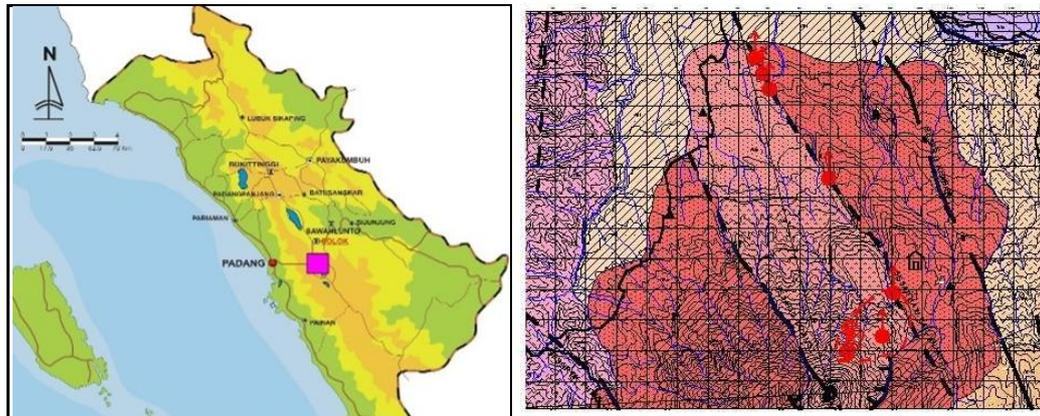
$$t^{\circ}\text{C} = 1309/(5,19 - \log \text{SiO}_2) - 273 \quad \dots\dots\dots (40)$$

Sedangkan untuk Na-K dan K-Mg, (Giggenbach, 1988)

$$t^{\circ}\text{C} = 1390/(\log(\text{Na}/\text{K})+1,75)-273 \quad \dots\dots\dots (41)$$

$$t^{\circ}\text{C} = 4410/(14,0-\log(\text{K}^2/\text{Mg}))-273 \quad \dots\dots\dots (42)$$

Untuk mendapatkan suhu reservoir, dilakukan perhitungan memakai rumus (40) berdasarkan data SiO_2 . Metode Resistivitas, digunakan Resistivitas sounding dan mapping, cukup efektif untuk mengetahui penyebaran manifestasi prospek panasbumi. Data sounding cukup bagus untuk mengetahui penyebaran reservoir secara vertikal. Data mapping cukup efektif untuk mengetahui penyebaran reservoir secara lateral, sehingga cukup signifikan untuk menentukan luas manifestasi, caranya dengan menentukan batas resistivitas daerah reservoir dan daerah luar reservoir. Data mapping dengan (AB/2, 250, 500, 750 dan 1000 m) yang telah dikumpulkan oleh DESDM dipetakan dan dilakukan analisis untuk memperoleh luasan manifestasi.



Gambar 14. Prospek Paasbumi Gunung Talang Sumatra Barat modifikasi dari Nurhayati (2004). Sebelah kanan adalah Peta Geologi Lapangan Paasbumi Gunung Talang

Besarnya cadangan energi listrik yang dimiliki oleh suatu reservoir panasbumi dapat dihitung menggunakan Rumus (3)

Reservoir panasbumi dapat diklasifikasikan menjadi 3 kategori berdasarkan suhu: (1) suhu rendah ($< 125^{\circ}\text{C}$), (2) suhu sedang (125 s.d. 225°C) dan (3) suhu tinggi ($> 225^{\circ}\text{C}$). Keadaan suhu reservoir menentukan besarnya kapasitas cadangan daya listrik (Q) per satuan luasnya. Besarnya kapasitas daya listrik (Q) yang dapat dihasilkan oleh suatu reservoir adalah ($Q = 10 \text{ MW}/\text{km}^2$ untuk reservoir suhu rendah), ($Q = 12,5 \text{ MW}/\text{km}^2$ untuk reservoir suhu sedang) dan ($Q = 15 \text{ MW}/\text{km}^2$ untuk reservoir suhu tinggi).

Berdasarkan perhitungan menggunakan data SiO_2 yang diperoleh dari sumber air panas yang dianggap paling mewakili prospek panasbumi daerah ini, menghasilkan harga suhu reservoir 160°C yang berarti kondisi reservoir bersuhu sedang memiliki sumber daya listrik $12,5 \text{ W}/\text{km}^2$.

Hasil analisis menunjukkan bahwa Suhu 210°C dan 175°C dihasilkan dari perhitungan menggunakan geotermometer SiO , dimana geotermometer tersebut cukup baik pada range suhu 20 s.d. 250°C . Berdasarkan analisis hasil perhitungan suhu reservoir prospek panasbumi ini digolongkan reservoir bersuhu sedang (antara 125°C s.d. 225°C). Atas dasar suhu reservoir ini maka perhitungan energi listrik yang dapat dihasilkan adalah $12,5 \text{ MW}/\text{km}^2$.

Penentuan luas daerah prospek dapat didekati dengan memperkirakan daerah bahwa daerah resevoir merupakan daerah yang mengalami alterasi kuat sehingga nilai resistivitasnya rendah. Batas reservoir dapat didekati dengan memperhatikan perubahan kontur resistivitas yang tajam, artinya daerah yang niali kontur resistivitasnya di bawah kontur yang terjal dapat diperkirakan sebagai area reservoir. Berdasarkan hasil analisis resistivitas, dapat diketahui

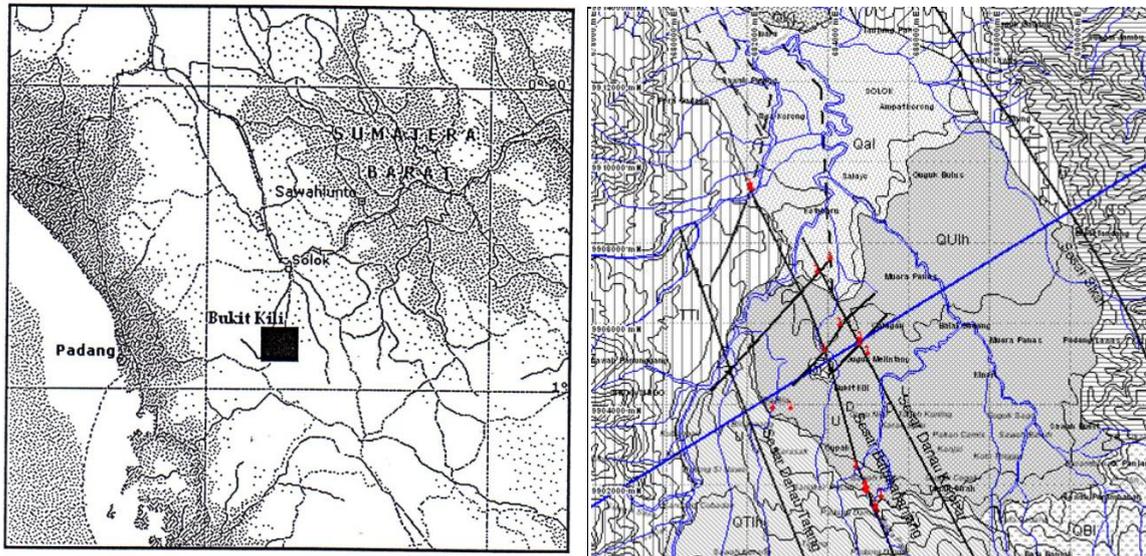
bahwa luasan reservoir adalah daerah yang dilingkupi oleh harga tahanan jenis semu lebih rendah dari $50 \Omega\text{m}$.

Pendekatan penentuan luas reservoir berdasarkan nilai resistivitas mapping, sesuai dengan analisis di atas maka luasan yang diperoleh sekitar 15 km^2 . Dengan kondisi reservoiri sedang maka dapat dihitung cadangan energi listriknya menggunakan Rumus (3).

$$W = 12,5 \times 12 = 145 \text{ MWe}$$

5.2. Lapangan Panas Bumi Bukit Kili Kab. Solok Sumatera Barat

Prospek Panas Bumi Bukit Kili memiliki manifestasi yang muncul ke permukaan berupa mata air panas, uap panas, batuan ubahan dan sinter karbonat memiliki pH netral dengan temperatur manifestasi bervariasi ($42,4\text{-}56,2^\circ\text{C}$). Tipe air untuk semua mata air panas di Bukit Kili dan sekitarnya adalah bikarbonat. Nilai suhu berdasarkan geothermometer di dapat dari rata-rata perhitungan antara Quartz-no steam loss dan Quartz-max steam loss sebesar 175°C . Dengan suhu cut off sebesar 120°C yang di dapat dari nilai temperatur cut off diambil dari asumsi yang terdapat dalam Standar Nasional Indonesia (SNI 13-6009-1999) dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 15. Prospek Paasbumi Bukit Kili Sumatra Barat modifikasi dari Aristriana (2004). Sebelah kanan adalah Peta Geologi Lokasi Panas Bumi Bukit Kili, Solok Sumatera Barat.

Estimasi Potensi Panasbumi menggunakan metode perhitungan yang dihitung menggunakan Rumus (4). $Q=0.2317 \times A \times f_h \times (T_{AG} - T_{cut-off})$. Ketebalan reservoir diasumsikan sebesar 0,5 km yang dilihat dari data geolistrik berdasarkan data *sounding* dan informasi geologi, luas reservoir diambil berdasarkan informasi geolistrik dengan data *mapping* pada $AB/2 = 250\text{m} - 1000\text{m}$ sekitar 12 km^2 , temperatur Geothermometer daerah penelitian setelah di rata-ratakan sebesar 175°C dan temperatur cut off 120°C .

Besarnya potensi energi listrik Bukit Kili pada tingkat terduga sebesar 76 MWe, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit tenaga listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- Giggenbach, 1988. Geothermal Solute Equilibria. Erivation of Na-K-Mg-Ca Geoindicators. *Geochemica Cosmochimica Acta*, vol. 52: 2749-2765.
- World Geothermal Conference 2010. International Geothermal Association, Bali Indonesia

- Nurhayati,I., 2005. Estimasi Keberadaan Reservoir Panasbumi dengan Menggunakan Metode Tahanan Jenis Listrik pada Lapangan Panasbumi Gunung Talang Kabupaten Solok Sumatra Barat. Skripsi S1, Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
- Simmons, S.F., 1998. Geochemistry lecture notes, Geothermal Institute, the University of Auckland, New Zealand.
- API NEWS, 2010. Penugasan Survei pendahuluan panas bumi. Information and Comunication Media of Indonesia Geothermal Association. Februari 2010.
- BADAN STANDARDISASI NASIONAL-BSN, 1998. Klasifikasi Potensi Energi Panas Bumi di Indonesia, STANDAR NASIONAL INDONESIA SNI 13-5012-1998, ICS 73.020.
- Cédric Nathanaël Hance, 2005. "Factors Affecting Costs Geothermal Power Development", the Geothermal Energy Association for the U.S. Department of Energy.
- Hochstein, M. P., and Sudarman, S., 1993, Geothermal resources of Sumatra: Geothermics, v. 22, No.3, p. 181-200.
- Hochstein, Manfred P., Sudarman S., History of geothermal exploration in Indonesia from 1970 to 2000, Geothermics 37, 2008, 220-266 pp.
- Nielson D., 1989. "Competitive economics of Geothermal Energy: The Exploration and Development Perspective", University of Utah.
- PGE, 2008. Presentasi prospek panas bumi Ulubelu. Seminar Nasional Program Studi Geofisika Universitas Lampung.
- Power Technologies Comparison, USA, 2010. Indonesia's Geothermal Development
- Saptadji, N. M., 2010. Buku Pedoman Kuliah Teknik Panas Bumi Iinstitut Teknologi Bandung.
- Sears, F. W. dan M. W. Zemansky, 1994. Fisika untuk Universitas terjemahan dari University Physics. Yayasan Dana Buku Indonesi kerja sama Addison-Wesley Publising Company, Inc., Jakarta-New York.
- Suharno, 2000. A geological and geophysical studies of the Ulubelu geothermal field in Tanggamus, Lampung, Indonesia. M.Sc Thesis of the University of Auckland.
- Suharno, 2003. Geophysical, Geological and Paleohydrological Studies of the Rendingan-Ulubelu-Waypanas (RUW) geothermal system, Lampung, Indonesia. Ph.D Thesis of the University of Auckland.
- USGS/CVO, 2001. Wikipedia bahasa Indonesia, ensiklopedia bebas, agusts 2010.
www.uneptie.org/energy