

**REKOMENDASI AREA LOKASI TAPAK SUMUR EKSPLORASI PANAS BUMI
MENGUNAKAN PEMODELAN SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS
DI DAERAH PROSPEK CISOLOK-CISUKARAME, SUKABUMI, JAWA BARAT**

**RECCOMENDATION FOR GEOTHERMAL EXPLORATION WELLPAD AREA
USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM MODELING
IN CISOLOK-CISUKARAME PROSPECT, SUKABUMI, WEST JAVA**

Husin Setia Nugraha¹, Dadan Wildan², Rina Wahyuningsih¹, dan Reynold Tampubolon¹

¹Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi

²Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung

husin.nugraha@esdm.go.id

ABSTRAK

Pemanfaatan pemodelan Sistem Informasi Geografis (SIG) dalam pengembangan sumber daya panas bumi telah banyak dilakukan mulai dari tahap survei awal, eksplorasi hingga eksploitasi atau produksi. Tujuan pemodelan SIG ini adalah untuk mendelineasi lokasi tertentu yang dianggap memiliki prospek bumi atau cocok untuk fasilitas produksi lapangan panas bumi. Studi ini bertujuan mendapatkan peta area rekomendasi tapak sumur (*wellpad*) untuk lokasi pengeboran sumur eksplorasi panas bumi yang optimal dengan mempertimbangkan parameter teknis dan non teknis. Studi ini dilakukan di area prospek panas bumi Cisolak-Cisukarame di Kabupaten Sukabumi, Provinsi Jawa Barat. Peta tersebut dihasilkan dengan mengintegrasikan delapan parameter yang akan mempengaruhi besarnya biaya pengeboran, yaitu area prospek, kemiringan lahan, kedalaman puncak reservoir, struktur geologi, sumber air, jalan akses, area pemukiman, area manifestasi permukaan, dan area cagar budaya. Pada tahap awal, terhadap parameter-parameter tersebut dilakukan pembuatan area bufer dan klasifikasi dengan rentang nilai tertentu berdasarkan beberapa pertimbangan. Selanjutnya dilakukan integrasi data spasial menggunakan operasi *vector overlaying Boolean*. Hasilnya adalah peta area rekomendasi tapak sumur eksplorasi panas bumi Daerah Cisolak-Cisukarame dengan luas sekitar 6,31 km² (19,62 % dari luas area prospek P₉₀). Dengan menggunakan grid jala ukuran 120 meter menghasilkan delapan area kluster besar dan lima area kluster kecil yang cocok sebagai tapak sumur lubang standar. Sedangkan dengan ukuran grid jala 50 meter menghasilkan jumlah kluster yang sama dan lima kluster lain yang lebih kecil. Hasil studi ini dapat dijadikan sebagai rekomendasi area untuk dijadikan lokasi tapak sumur dan perencanaan kegiatan survei lapangan selanjutnya seperti survei geoteknik dan survei infrastruktur.

Kata kunci: pemodelan SIG, sumur eksplorasi panas bumi, tapak sumur *slimhole*, *vector overlaying Boolean*, Prospek Cisolak-Cisukarame.

ABSTRACT

The use of Geographic Information System (GIS) modelling in developing geothermal resources has been widely carried out, from the initial survey and exploration to exploitation or production stages. This GIS modelling aims to delineate specific locations that are considered to have geothermal resources or are suitable for geothermal field production facilities. This study aims to obtain a map of the recommended wellpad area for the optimal geothermal exploration well drilling location by considering technical and non-technical parameters. This research was conducted in the Cisolak-Cisukarame geothermal prospect area in Sukabumi Regency, West Java Province. The map is produced by integrating eight parameters that will affect the amount of drilling costs: prospect area, slope, reservoir crest depth area, geological structure, water source, access road, settlement area, surface manifestation area, and cultural

heritage area. In the early stages, buffer areas and classifications were made for these parameters with a specific range of values based on several considerations. Furthermore, spatial data integration is carried out using vector overlaying boolean operations. The result is a map of the wellpad recommendation area for geothermal exploration wells in the Cisolok-Cisukarame area, with an area of approximately 6.31 km² (19.62% of the P₉₀ prospect area). Using a 120-meter fishnet produces eight large cluster areas and five small cluster areas, which are suitable for wellpad of standard hole. Meanwhile, the 50-meter fishnet produces the same number of clusters and five other smaller clusters. The results of this study can be used as recommendations for areas to be used as well as footprint locations and planning for further field survey activities such as geotechnical and infrastructure surveys.

Keywords: GIS modelling, geothermal exploration well, slimhole wellpad, vector overlaying Boolean, Cisolok-Cisukarame Prospect.

PENDAHULUAN

Pemanfaatan pemodelan Sistem Informasi Geografis (SIG) dalam pengembangan sumber daya panas bumi telah banyak dilakukan mulai dari tahap survei awal, eksplorasi hingga tahap eksploitasi dan produksi. Tujuan pemodelan SIG ini adalah untuk mendelineasi lokasi tertentu yang dianggap memiliki sumber daya panas bumi atau lokasi yang tepat untuk penempatan fasilitas produksi lapangan panas bumi. Studi-studi tentang pemodelan SIG ini paling banyak dilakukan pada tahap eksplorasi awal untuk mengidentifikasi perkiraan area prospek.

Pemodelan SIG untuk tujuan eksplorasi panas bumi dapat dilakukan dalam berbagai skala area studi mulai dari skala benua sampai skala sub-regional (Jara-Alvear *et al.*, 2023). Manzella *et al.* (2019) melakukan pemodelan SIG untuk eksplorasi panas bumi dalam skala benua. Untuk skala nasional telah dilakukan oleh Yousefi dan Ehara (2008); dan Zaher *et al.* (2018). Sementara, Noorollahi *et al.* (2007a); Carranza *et al.* (2008); dan Noorollahi *et al.* (2015) telah mendelineasi area prospek panas bumi pada skala regional. Dezayes *et al.* (2022) secara khusus melakukan pemodelan SIG untuk eksplorasi panas bumi pada skala pulau kecil.

Semua data tersebut diintegrasikan secara spasial untuk pembuatan model tentatif sistem panas bumi secara dua dimensi menggunakan pemodelan SIG. Nugraha *et*

al. (2021) menggunakan data peta suhu permukaan tanah atau *land surface temperature (LST)*, *fault fracture density (FFD)* dan alterasi untuk mendelineasi area prospek panas bumi sebelum survei lapangan dilaksanakan. Abuzied *et al.* (2020) menggunakan delapan parameter *input* seperti jarak ke struktur geologi utama, kerapatan kelurusan geologi, suhu permukaan tanah, kerapatan aktivitas seismik, aliran panas, gradien suhu pada kedalaman tertentu, kedalaman *currie point* dan anomali bouguer lengkap. Yalcin dan Gul (2017) membuat model spasial berbasis SIG dengan menggunakan parameter jarak terhadap sumber air panas, formasi geologi indikator, patahan, kepadatan *drainage* dan anomali suhu permukaan tanah. Sementara Kiavarz dan Jelokhani-Niaraki (2017) menggunakan model SIG dengan parameter lokasi puncak gunung api, litologi batuan vulkanik, indikasi patahan, lokasi fumarol dan air panas serta suhu permukaan tanah.

Pada tahap pra-produksi hingga produksi, pemodelan SIG telah digunakan antara lain untuk melihat pengaruh produksi terhadap manifestasi panas di permukaan, penentuan lokasi pembangkit, dan pemodelan sebaran emisi dari pembangkit. García-Estrada *et al.* (2008) menggunakan model SIG ini untuk melihat pengaruh jarak antara sumur produksi dengan keberadaan manifestasi panas di permukaan. Pemodelan SIG untuk penentuan lokasi pembangkit dilakukan Yousefi dan Ehara (2008) dengan menggunakan parameter yang berbeda. Tiga jenis set data yaitu data

fisik (kemiringan, hidrologi dan patahan), sosio-ekonomi (pusat populasi, penggunaan lahan dan akses jalan), dan teknis (area anomali, lokasi tapak sumur dan mata air panas). Dari model SIG tersebut menghasilkan rekomendasi tujuh lokasi untuk pembangunan pembangkit dengan luas hanya satu persen dari area studinya. Dengan tujuan yang sama, Coro dan Trumpy (2020) menggunakan metode entropi maksimum menggabungkan data sebaran CO₂, kepadatan kejadian gempa bumi, ketinggian, aliran panas global dan suhu udara permukaan. Sedangkan Gouareh *et al.* (2015) dan Yousefi-Sahzabi *et al.* (2011) menggunakan pemodelan SIG ini untuk melihat penyebaran gas tak terkondensasi (NCG) khususnya CO₂ dari pembangkit panas bumi. Yousefi-Sahzabi *et al.* (2011) melakukan penelitian dari pembangkit panas bumi berjenis binari sedangkan Yousefi dan Ehara (2008) dari pembangkit konvensional berjenis *flash* dengan kapasitas 55 MW_e.

Sedangkan, studi yang dilakukan untuk penentuan lokasi sumur, seperti yang dilakukan oleh Noorollahiet *al.* (2015), Ghasempour *et al.* (2015) dan Noorollahi *et al.* (2008a) hanya mempertimbangkan parameter-parameter geosain. Sementara parameter-parameter teknis non-geosains digunakan sebagai parameter pembatas oleh Omwenga *et al.* (2019); dan Omwenga (2020). Selain pertimbangan teknis, terdapat regulasi yang juga membatasi parameter-parameter teknis yang digunakan. Selain itu, sampai saat ini belum ada studi yang menggunakan parameter-parameter non-geosain seperti area pemukiman, penggunaan lahan dan akses jalan sebagai pertimbangan seperti yang digunakan Yousefi dan Ehara (2008) dalam menentukan lokasi pembangkit listrik panas bumi. Parameter-parameter di atas digunakan sebagai pembatas (*constraint*) teknis untuk mendapatkan area *favorable* atau area yang direkomendasikan. Pada kenyataannya, parameter pembatas tersebut tidak terbatas pada parameter teknis, namun parameter pembatas ini juga timbul karena adanya regulasi, keadaan sosial, dan adat

tertentu pada suatu lokasi. Bahkan parameter pembatas ini dapat menjadi parameter *go or no-go* suatu proyek yang lebih dominan.

Studi ini bertujuan mendapatkan peta area rekomendasi tapak sumur (*wellpad*) untuk lokasi pengeboran sumur eksplorasi panas bumi yang optimal dengan mempertimbangkan parameter teknis dan non teknis seperti regulasi dan kearifan lokal yang harus diikuti. Hasil dari studi ini selanjutnya secara khusus dapat digunakan pemangku kepentingan untuk menentukan lokasi tapak sumur eksplorasi panas bumi di area Cisolak-Cisukarame dan secara umum metode ini dapat diterapkan pada lokasi-lokasi lain. Tujuan dari pengeboran sumur eksplorasi sendiri adalah untuk mengkonfirmasi keberadaan sumber daya panas bumi yang diperkirakan berdasarkan hasil survei 3G (geologi, geokimia dan geofisika).

Studi ini dilakukan di area prospek panas bumi Daerah Cisolak-Cisukarame di Kabupaten Sukabumi, Provinsi Jawa Barat (**Gambar 1**). Area prospek ini telah ditetapkan sebagai Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) pada tahun 2007 berdasarkan surat keputusan Menteri ESDM nomor 1937.K/30/MEM/2007 dengan total sumber daya yang tercantum sebesar 30 - 45 MW_e dengan luas WKP sebesar 15.580 hektar (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2007).

METODOLOGI

Metodologi yang digunakan untuk studi ini adalah pemodelan spasial berbasis SIG. SIG ini dapat membantu analisis pemilihan lokasi yang sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Hal ini dapat menangani data dan informasi spasial untuk mengambil keputusan dengan lebih objektif dan mengurangi faktor *human error* (Noorollahi *et al.*, 2007b). Pemodelan SIG didefinisikan oleh Jensen dan Jensen (2012) sebagai struktur informasi digital yang merepresentasikan fenomena yang ada di atas dan/atau bawah permukaan bumi berupa data vektor dan raster.

Pemodelan SIG terdiri dari dua kegiatan yaitu operasional parameter *input* dan pembobotan atau pemeringkatan. Operasional parameter dapat dilakukan dalam bentuk data vektor atau raster. Operasi vektor yang sering dipakai adalah operasi *boolean* yaitu *union* (OR), *intersection* (AND), pengurangan (NOT). Sedangkan untuk data raster, operasi matematik biasa dapat diterapkan pada data. Dalam pembobotan atau perankingan akan menggunakan metode *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM). Penerapannya dapat dilakukan pada parameter *input*, hasil operasional spasial atau pada keduanya. Ozsahin *et al.* (2021) mendefinisikan MCDM sebagai cabang ilmu yang berhubungan dengan bagaimana sebuah keputusan lebih baik diambil dari pilihan-pilihan yang ada berdasarkan kriteria atau sifat-sifat pada data dan informasi yang sebelum tidak begitu jelas bagi pengambil keputusan. Lebih lanjut, Alias *et al.* (2008) membagi metode MCDM ini menjadi MCDM konvensional dan MCDM *Artificial Intelligent* (AI).

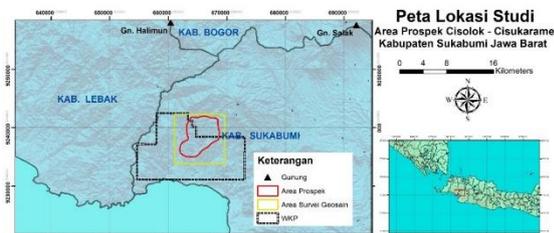
Pemodelan SIG yang berhubungan dengan panas bumi telah menggunakan kedua jenis MCDM tersebut dalam tahap pembobotan. Contoh penerapan MCDM konvensional dalam pemodelan SIG antara lain dilakukan oleh Noorollahi *et al.* (2007a); Noorollahi *et al.* (2015); dan Nugraha *et al.* (2021) menggunakan metode *boolean and index overlay knowledge driven*. Dua penerapan MCDM konvensional selanjutnya adalah Yalcin dan Gul (2017) menggunakan metode AHP dan Kiavarz dan Jelokhani-Niaraki (2017) mengaplikasikan metode *ordered weighted averaging* (OWA). Sedangkan penerapan MCDM AI telah dilakukan oleh Sadeghi dan Khalajmasoumi (2015) menggunakan metode kombinasi *binary index overlay and fuzzy logic methods* dan Abuzied *et al.* (2020) menggabungkan metode *information value* (IV) and *weights-of-evidence* (WoE).

Pemodelan SIG untuk membuat peta area rekomendasi tapak sumur pada studi ini

dibagi menjadi dua tahap yaitu penyiapan parameter-parameter *input* dan integrasi data spasial. Pada tahap awal ini, terhadap beberapa parameter dilakukan pembuatan area bufer dan klasifikasi dengan rentang nilai tertentu. Penentuan batas nilai tersebut dilakukan berdasarkan beberapa pertimbangan yaitu pengetahuan teknis dan/atau regulasi yang ada. Secara umum pembobotan tersebut didasarkan pada perkiraan bobot biaya yang akan dikeluarkan dalam proses pengeboran. Sebagai contoh, biaya pengeboran sangat tergantung pada kedalaman sumur. Semakin dalam suatu sumur maka akan semakin besar biaya yang dikeluarkan. Jadi untuk lokasi yang diperkirakan memiliki total kedalaman yang relatif besar akan diberikan bobot lebih kecil dibandingkan lokasi dengan perkiraan total kedalaman lebih dangkal. Sebelum diintegrasikan, data spasial ini disesuaikan dengan area prospek panas bumi. Tahap integrasi data spasial adalah penerapan operasi *vector overlaying boolean*. Pembuatan area bufer, operasi *boolean* dan pengklasifikasian dapat dilakukan dengan menggunakan piranti lunak SIG seperti ArcGIS 10 (Gorr dan Kurland 2020)

Peta area rekomendasi tapak sumur eksplorasi panas bumi (PAR) sebagai hasil akhir studi ini merupakan integrasi dari delapan parameter, yaitu Peta Area Prospek (AP), Peta Kemiringan Lahan (KL), Peta Area Kedalaman Puncak Reservoir (PR), Peta Struktur Geologi (SG), Peta Sumber Air (SA), Peta Jalan Akses (JA), Peta Area Pemukiman (AM), Peta Area Manifestasi Permukaan (MP), dan Peta Cagar Budaya (CB). Parameter-parameter ini dapat dikategorikan sebagai parameter yang akan mempengaruhi besarnya biaya pengeboran secara langsung seperti PR, KL, SG, SA, dan JA. Jarak secara vertikal dari PR dan SG; dan jarak horizontal dari KL, SA, dan JA akan mempengaruhi besar biaya pengeboran sumur. Sedangkan AM, MP, dan CB merupakan parameter-parameter yang menjadi area terlarang untuk dilakukan pengeboran sumur eksplorasi panas bumi.

Data dan informasi yang dipergunakan dalam studi ini berasal dari dua sumber utama yaitu hasil survei lapangan Daerah Cisolok-Cisukarame dan data yang diunduh dari situs web Badan Informasi Geospasial (BIG). Data dan informasi yang berasal hasil survei lapangan antara lain area PR, SG dan MP. Sedangkan data dan informasi yang berasal dari situs web BIG adalah KL yang merupakan hasil pemrosesan dari citra DEMNAS, sementara SA, JA, AM dan CB merupakan hasil olahan Peta Rupa Bumi Indonesia atau RBI (BIG, 2023).



Gambar 1. Lokasi Studi Area Panas Bumi Cisolok-Cisukarame

PENYIAPAN PARAMETER INPUT

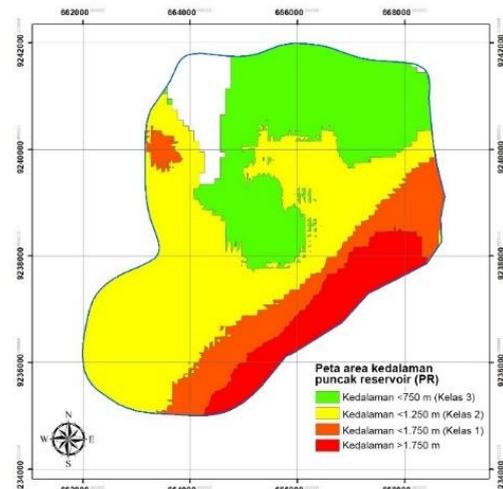
Sebelum dilakukan integrasi data untuk mendapatkan peta area rekomendasi tapak sumur untuk lokasi pengeboran sumur eksplorasi panas bumi, semua parameter *input* dilakukan pemotongan data spasial sesuai dengan bentuk area prospek P₁₀, pembuatan area bufer dan klasifikasi area ke dalam tiga kelas.

Peta area kedalaman puncak reservoir (PR)

Peta area kedalaman puncak reservoir (PR) merupakan peta kedalaman terbawah dari lapisan yang dianggap sebagai batuan tudung (*caprock*), didapatkan ketebalan batuan tudung 300-1.800 meter. Sedangkan reservoirnya memiliki ketebalan 200-1.000 meter dengan kedalaman puncak reservoir di 700-1.900 meter (Anonim, 2021). Batuan tudung dari survei magnetotelurik (MT) di ambil nilai batas resistivitas sebesar 21 ohm-meter dengan asumsi bahwa suhu reservoir

sebagai reservoir suhu menengah (<225°C)

Kelas ini dipilih dengan asumsi bahwa total kedalaman sumur pada masing-masing kelas adalah kedalaman sampai dengan 750 meter (kelas 3), kedalaman sampai dengan 1.250 meter (kelas 2) dan kedalaman sampai dengan 1.750 meter (kelas 1). Bagian utara sampai bagian tengah prospek dikategorikan sebagai area kelas 3 yaitu area dengan kedalaman puncak reservoir sampai dengan 750 meter. Kelas ini merupakan kelas dengan nilai pembobotan tertinggi (3 poin). Kelas 2 merupakan kelas paling dominan di sebagian besar area prospek yaitu di bagian barat, selatan dan tengah area prospek. Sedangkan bagian timur, kedalaman *BoC* (*Base of Conductor*) atau dasar dari lapisan konduktif didominasi oleh kelas 1 yaitu kedalaman antara 1.250-1.750 meter dan yang termasuk sebagai area terlarang (>1.750 meter). Untuk klasifikasi area terlarang ini, selain area dengan kedalaman *BoC* lebih dari 1.750 meter, area yang tidak memiliki indikasi adanya *BoC* juga termasuk dalam kategori ini. Area prospek yang tidak terdapat *BoC* yaitu area pada bagian barat-laut dan timur-laut area prospek. Sehingga pada bagian ini dikategorikan juga sebagai area yang tidak disarankan sebagai lokasi tapak sumur.

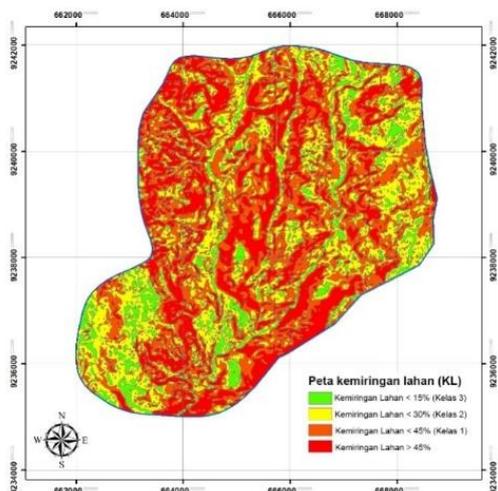


Gambar 2. Peta area kedalaman puncak reservoir (PR) modifikasi dari Anonim (2021)

Peta kemiringan lahan (KL)

Peta kemiringan lahan (KL) merupakan peta yang menggambarkan kemiringan lahan pada area studi dengan satuan persentase. Peta ini dihasilkan dari pengolahan perhitungan raster dari citra DEMNAS dengan resolusi spasial 8,2 meter. Kemiringan lahan tersebut selanjutnya diklasifikasikan menjadi empat kelas dengan interval sebesar 15%. Area dengan kemiringan sampai dengan 45% dianggap area yang masih cocok untuk lokasi tapak sumur sedangkan area dengan kemiringan 45% atau lebih besar dianggap sebagai area *non-suitable* atau area yang terlarang.

Gambar 3 memperlihatkan bahwa kemiringan lahan area prospek didominasi area dengan kemiringan curam. Area dengan kemiringan di atas 30% ini melingkupi 61% area prospek. Untuk area yang dikategorikan kelas 3 ($\leq 15\%$) dan kelas 2 ($\leq 30\%$) yang terletak di bagian barat daya dan timur laut area prospek.



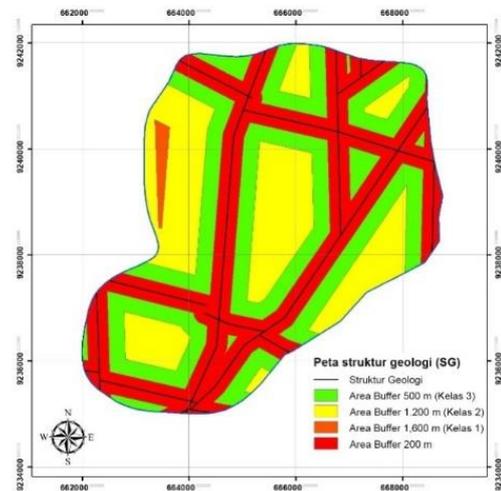
Gambar 3. Peta kemiringan lahan (KL)

Peta struktur geologi (SG)

Dalam desain sumur panas bumi, area struktur geologi dianggap mewakili area yang memiliki tingkat permeabilitas tinggi yang menjadi target pengeboran. Jadi area rekomendasi tapak sumur sebaiknya dekat dengan area struktur geologi. Karena data struktur geologi ini berupa garis maka

dibuat *proximity area* dengan membuat area bufer dengan jarak tertentu dari garis tersebut.

Untuk studi ini, peta SG merupakan peta hasil *multi-buffering* dengan jarak maksimum 200 meter; 500 meter; 1.200 meter; dan 1.600 meter dari struktur geologi utama (**Gambar 4**). Nilai 200 meter bufer tersebut merupakan area bufer sekitar struktur geologi. Area bufer ini merupakan area yang tidak stabil sehingga memiliki potensi bencana yang tinggi sebagaimana dijelaskan dalam studi yang dilakukan oleh Yousefi dan Ehara (2008) dalam menentukan lokasi yang cocok untuk pembangunan pembangkit listrik panas bumi. Nilai bufer kedua merupakan area dengan kategori kelas 3. Nilai ini diambil berdasarkan studi dari Noorollahi *et al.* (2008b) mengambil jarak bufer sejauh 500 meter ke arah dip struktur geologi tersebut. Untuk kelas selanjutnya diambil batas nilai bufer sejauh 1,2 km dan 1,6 km berdasarkan pertimbangan teknis yang biasa digunakan dalam pengeboran sumur miring (*directional*) panas bumi.



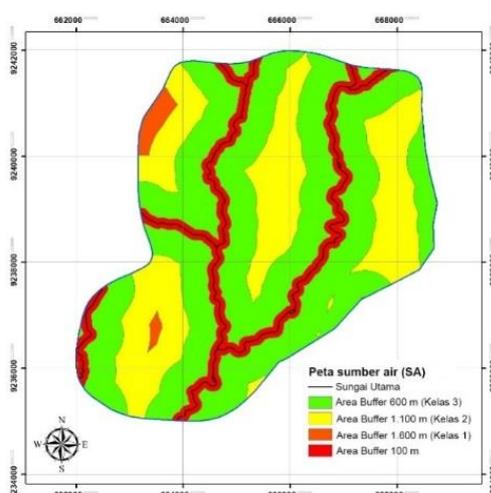
Gambar 4. Peta struktur geologi (SG) modifikasi dari Anonim (2021)

Peta sumber air (SA)

Peta sumber air (SA) merupakan area bufer yang menunjukan jarak kandidat tapak sumur dengan sumber air. SA ini merupakan salah satu parameter yang mempengaruhi biaya pengeboran yang

besarnya harus diminimalkan. Jadi semakin jauh jarak dengan sumber air maka semakin besar biaya pengeboran yang akan dikeluarkan. Fitur sebagai sumber air adalah sungai, danau, embung atau sumber air permukaan lainnya yang didapatkan dari Peta RBI.

Gambar 5 merupakan SA dengan tiga kelas dengan jarak maksimum 1.600 meter dengan rentang kelas 500 meter. Jarak sejauh 1.500 meter ini masih dianggap memungkinkan secara teknis dan ekonomis untuk pengeboran eksplorasi di daerah pegunungan seperti area Cisukarame ini. Sedangkan, Yousefi dan Ehara (2008) mengambil jarak lebih pendek yaitu hanya 200 meter sebagai area bufer dari sumber air untuk menentukan lokasi pembangkit panas bumi. Selain itu, area bufer sejauh 100 meter dari jarak sumber air diambil menjadi daerah terlarang sesuai dengan regulasi yang ada tentang area sempadan sungai. Sempadan ini yang berjarak 50-100 meter tergantung pada lokasi sungai atau danau tersebut berada dengan tujuan untuk menghindari bahaya dan pencemaran air permukaan (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2015). Dengan tujuan yang sama, untuk bufer area terlarang ini, Baffoe dan Sarpong (2016) menyarankan jarak paling sedikit 250 meter antara aktivitas manusia dengan sungai dan sumber air lain.

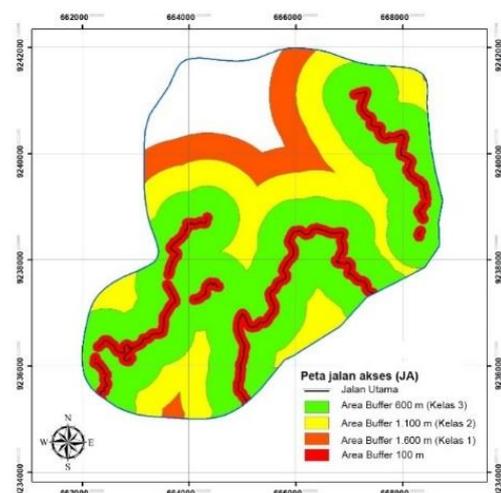


Gambar 5. Peta sumber air (SA) modifikasi dari BIG (2023)

Sungai besar yang melintang dari utara-selatan menunjukkan bahwa sumber air untuk pengeboran di daerah Cisolak-Cisukarame ini tersedia cukup ideal. Hal ini ditunjukkan dengan luas area bufer kelas 3 dengan jarak di bawah 600 meter yang mencapai 56% dari area prospek. Bahkan jika digabungkan dengan kelas 2 akan mencapai 85% dari area prospek.

Sama dengan pembuatan peta SA, untuk membuat peta JA, diambil jarak sejauh 500 meter kiri dan kanan dari pusat jalan akses tersebut seperti di tunjukkan pada **Gambar 6**. Nilai jarak tersebut dianggap masih masuk dalam perhitungan keekonomian mengingat ini merupakan sumur eksplorasi. Sebagai perbandingan, Baffoe dan Sarpong (2016) mengambil jarak maksimum sejauh 2 km untuk memilih lokasi pembangkit tenaga angin. Sedangkan Yousefi dan Ehara (2008) mengambil nilai 100 meter bufer untuk mencari lokasi pembangkit panas bumi yang ideal, jarak tersebut dapat dibuat lebih dekat karena telah tersedia infrastruktur.

Infrastruktur jalan pada lokasi Cisolak-Cisukarame bisa dikatakan cukup baik. Hal ini ditunjukkan dengan luas JA pada kelas 3 dan kelas 2 yang mencapai 56% dan 29%. Jalan-jalan tersebut menghubungkan antara area luar prospek dengan area-area pemukiman dalam area prospek.



Gambar 6. Peta jalan akses (JA) modifikasi dari BIG (2023)

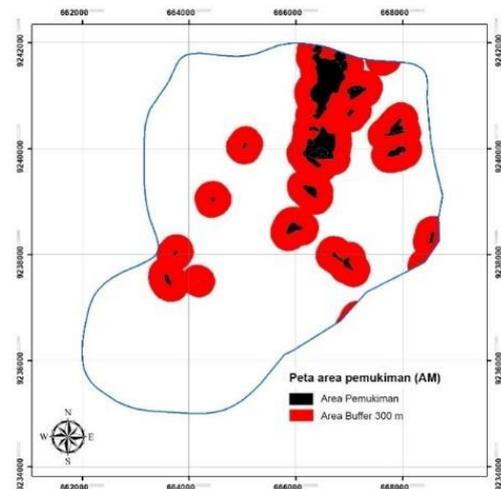
Peta area pemukiman (AM)

Berdasarkan pertimbangan teknis dan regulasi aktivitas pengusahaan panas bumi tidak dapat dekat dengan pemukiman, daerah wisata dan/atau tempat yang memiliki nilai sejarah dan budaya. Faktor teknis dapat dilihat antara lain dari aspek keselamatan dan kesehatan kerja dan lingkungan lingkungan (K3LL). Pertimbangan K3LL antara lain adanya kebisingan dan adanya kemungkinan perubahan muka bumi yang akan mempengaruhi kehidupan masyarakat. Dari sisi regulasi, terdapat peraturan-peraturan yang menyebabkan pengusahaan panas bumi tidak dapat terlalu dekat dengan pemukiman. Ada beberapa peraturan baik langsung maupun tidak langsung dan masih berhubungan dengan faktor teknis yang harus dipatuhi. Peraturan tersebut antara lain regulasi tentang jarak minimum dengan kegiatan tambang dan tingkat kebisingan. Di Iran, terdapat regulasi yang menentukan jarak minimum pembuatan sumur dalam seperti sumur panas bumi jarak minimum dari pemukiman, yaitu minimal sejauh 1.000 meter (Noorollahi et al., 2008b). Sedangkan Yousefi dan Ehara (2008) menyarankan jarak paling dekat sejauh 500 meter untuk lokasi pembangkit panas bumi.

Dengan pertimbangan regulasi dan teknis, studi ini mengambil nilai AM sejauh 300 meter dari pemukiman (**Gambar 7**). Jarak sejauh itu merupakan nilai kompromi dari berbagai peraturan dan standar yang ada. Salah satu standar yang dapat diacu dalam kasus ini SNI tentang Operasi Pengeboran Darat dan Lepas Pantai yang Aman di Indonesia. SNI ini menjelaskan bahwa jarak tapak sumur dengan jalan umum, rel kereta api, dan pemukiman adalah paling sedikit sejauh 100 meter. Selain standar, meskipun tidak secara khusus untuk kegiatan pengusahaan panas bumi, dengan asumsi bahwa aktivitas pengeboran sumur eksplorasi panas bumi dan tambang terbuka adalah sama dalam penggunaan alat-alat berat maka Peraturan Menteri Lingkungan Hidup

tentang Indikator Ramah Lingkungan untuk Usaha dan/atau Kegiatan Penambangan Terbuka Batubara menjadi peraturan yang diacu. Peraturan tersebut menjelaskan bahwa jarak minimal tepi galian lubang tambang dengan pemukiman warga adalah 500 meter.

Dengan *proximity* sejauh 300 meter tersebut, maka luas area AM tersebut melingkupi sekitar 27% dari area prospek. **Gambar 7** menunjukkan bahwa sebagian besar pemukiman berada di daerah utara dan tengah pada area prospek. Pada daerah utara dan timur prospek merupakan area dengan elevasi cukup tinggi. Sebagian kecil dari pemukiman ini juga berada di sekitar timur dan barat dari area prospek.



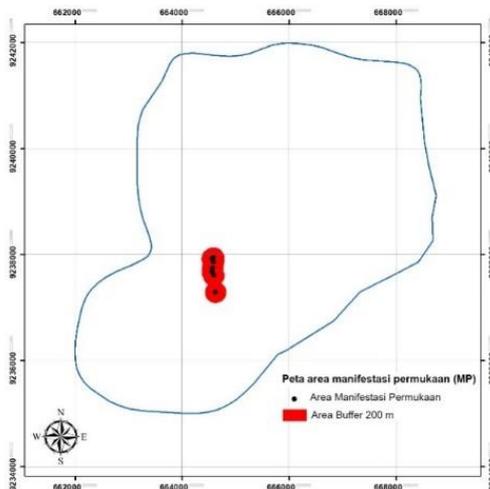
Gambar 7. Peta area pemukiman (AM) modifikasi dari BIG (2023)

Peta area manifestasi permukaan (MP)

Peta area manifestasi permukaan (MP) juga merupakan parameter untuk membuat area terlarang untuk lokasi tapak sumur adalah area bufer di sekitar manifestasi termal. Manifestasi termal dimaksud antara lain mata air panas, tanah panas, area terubah (*altered*) dan fumarol. MP pada studi ini diambil sejauh 100 meter berdasarkan studi yang dilakukan oleh Yousefi and Ehara (2008).

Parameter jarak lokasi tapak sumur dari titik manifestasi tersebut ditentukan

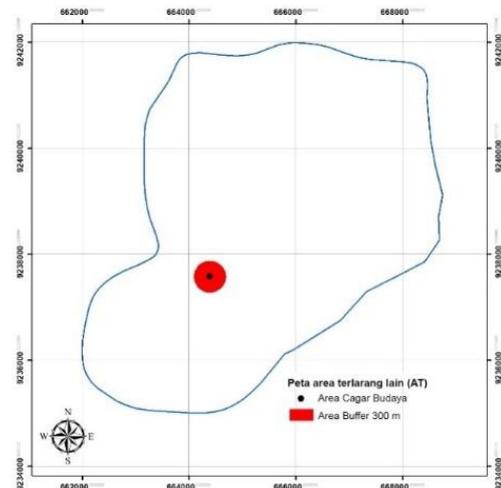
berdasarkan dari segi K3 dan segi ekonomi-lingkungan. Sama dengan area sekitar struktur geologi, area sekitar manifestasi permukaan juga dianggap sebagai indikasi zona lemah. Jadi MP merupakan area yang sebaiknya dihindari digunakan sebagai lokasi untuk bangunan permanen termasuk untuk sumur panas bumi.



Gambar 8. Peta area manifestasi permukaan (MP) modifikasi dari Anonim (2021)

Peta area cagar budaya (CB)

Peta area cagar budaya (CB) merupakan parameter tambahan sebagai area terlarang untuk lokasi tapak sumur panas bumi. Area-area terlarang ini bisa karena secara regulasi (kawasan hutan konservasi dan taman nasional), adat atau pertimbangan seperti area yang dikeramatkan. Di lokasi Cisolak-Cisukarame, area terlarang terdapat di sekitar warisan cagar budaya (CB) (Gambar 9).



Gambar 9. Peta cagar budaya (CB) modifikasi dari BIG (2023)

Tabel 1. Nilai Batas Bufer untuk Masing-Masing Parameter *Input*.

No	Parameter	Bufer			
		Daerah Terlarang	Kelas 3	Kelas 2	Kelas 1
1.	PR	>1,750 m	<=750 m	<=1,250 m	<=1,750 m
2.	KI	>45%	<=15%	<=30%	<=45%
3.	SG	<=200 m	<=500 m	<=1.200 m	<=1.600 m
4.	SA	<=100 m	<=600 m	<=1.100 m	<=1.600 m
5.	JA	<=100 m	<=600 m	<=1.100 m	<=1.600 m
6.	AM	<=300 m	-	-	-
7.	MP	<=200 m	-	-	-
8.	CB	<=300 m	-	-	-

INTEGRASI DATA SPASIAL

Tahap integrasi data spasial terdiri dari pembuatan dua peta hasil antara dan peta hasil akhir sebagaimana tergambar pada Gambar 10. Peta hasil antara yaitu peta area yang disarankan (PAS) dan peta area yang tidak disarankan (PTS) sebagai lokasi tapak sumur eksplorasi. PAS merupakan hasil irisan area parameter-parameter untuk memilih lokasi yang cocok untuk tapak sumur (**Formula 1**). Sebaliknya, PTS adalah hasil gabungan area parameter-parameter yang terlarang sebagai area lokasi tapak sumur (**Formula 2**). Peta hasil akhir adalah peta rekomendasi tapak sumur yang merupakan hasil pengurangan area PAS dengan PTS (**Formula 3**).

Pembuatan Peta Area Yang Disarankan Untuk Tapak Sumur Panas Bumi (PAS)

Peta Area Yang Disarankan Untuk Tapak Sumur Panas Bumi (PAS) merupakan hasil integrasi spasial dari lima parameter yaitu KL, PR, SG, SA dan JA. Pertama, kelima parameter tersebut dilakukan *intersecting* (**AND**) yang menghasilkan area dan atribut baru (**Formula 1**). Nilai atribut baru tersebut merupakan hasil penjumlahan kelas masing-masing kelima parameter tersebut. Selanjutnya, nilai atribut tersebut diklasifikasikan kembali menjadi tiga kelas dengan interval kelas sebesar kisaran dibagi tiga. Hasil akhir tersebut memiliki tiga kelas area yang dikategorikan sebagai Area Disarankan Kelas Tingkat Tinggi, Area Disarankan Kelas Tingkat Menengah

dan Area Disarankan Kelas Tingkat Rendah sebagai area untuk lokasi tapak sumur eksplorasi panas bumi.

Pembuatan Peta Area Yang Tidak Disarankan Tapak Sumur Panas Bumi (PTS)

Peta zona terlarang merupakan hasil integrasi spasial dari tiga parameter pembatas yaitu AM, MP, dan AT dengan operasi vektor *Union* (**OR**) menggunakan **Formula 2**. Peta ini mewakili area terlarang untuk lokasi tapak sumur karena gabungan beberapa faktor. Faktor tersebut disebabkan oleh pertimbangan teknis, ketentuan regulasi atau pertimbangan sosial. Hasilnya adalah Peta Area Yang Tidak Disarankan Tapak Sumur Panas Bumi (PTS).

Pembuatan Peta Area Rekomendasi Tapak Sumur Panas Bumi (PAR)

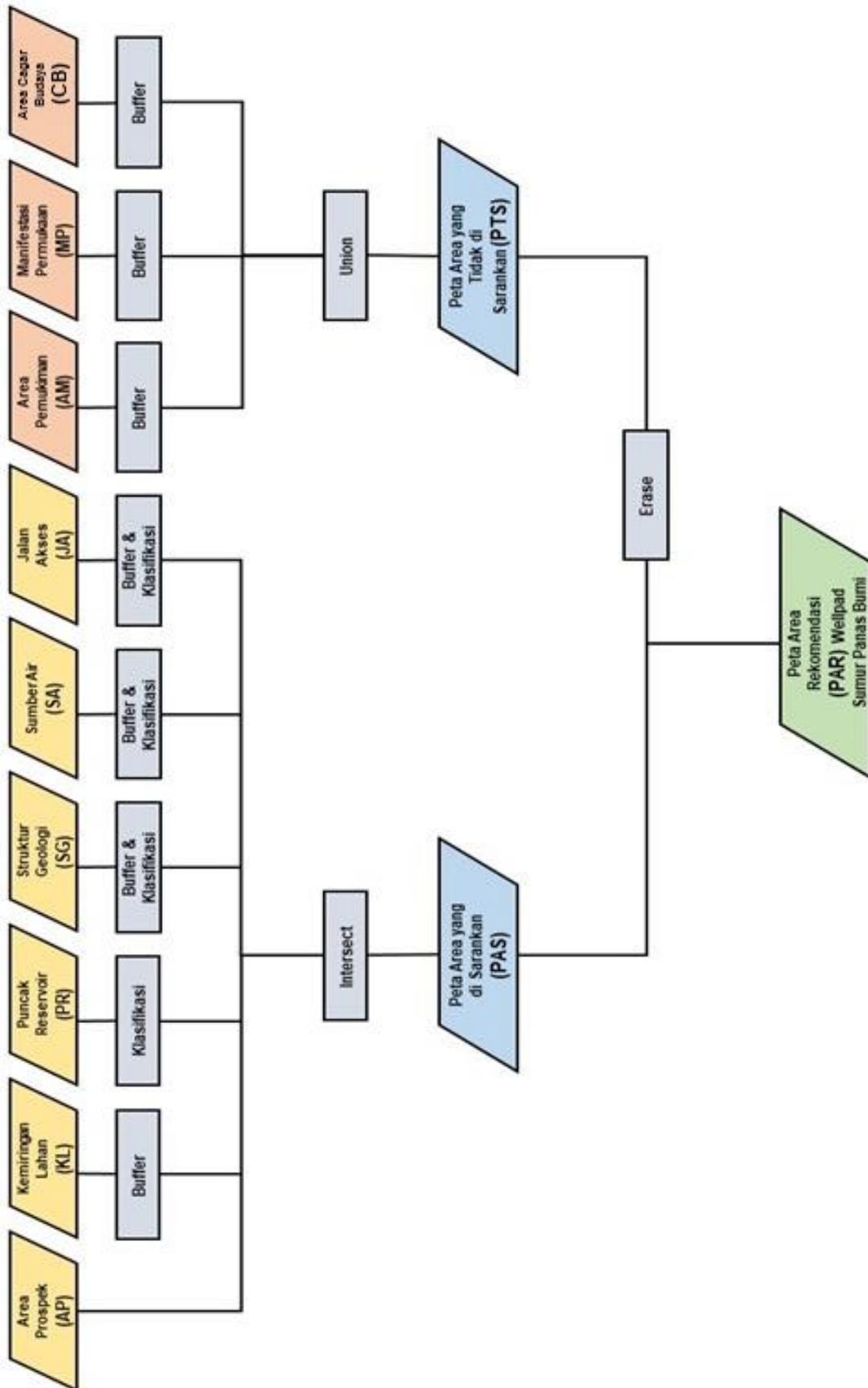
Peta Area Rekomendasi Tapak Sumur Panas Bumi (PAR), yang merupakan hasil akhir studi ini, merupakan hasil pengurangan area yang disarankan (PAS) dengan area yang tidak (PTS) menggunakan operasi vektor *Erase* (**NOT**) menggunakan **Formula 3**. Area dalam PAR ini memiliki tiga kelas dengan kriteria yang sama dengan PAS, yang dinamai kembali sebagai Area Rekomendasi Kelas Tingkat Tinggi, Area Rekomendasi Kelas Tingkat Menengah dan Area Rekomendasi Kelas Tingkat Rendah sebagai area untuk tapak sumur eksplorasi panas bumi.

$$\begin{aligned}
 PAS &= AP \cap KL \cap PR \cap SG \cap SA \cap JA \dots\dots\dots(1) \\
 PTS &= AM \cup MP \cup CB \dots\dots\dots(2) \\
 PAR &= PAS - PTS \dots\dots\dots(3)
 \end{aligned}$$

dengan,

- \cap : *Intersect (AND)*
- \cup : *Union (OR)*
- : *Erase (NOT)*
- PAR : Peta Area Rekomendasi Tapak Sumur Panas Bumi
- PAS : Peta Area Yang Disarankan
- PTS : Peta Area Yang Tidak Disarankan
- AP : Peta Area Prospek
- KL : Peta Kemiringan Lahan
- PR : Peta Area Kedalaman Puncak Reservoir
- SG : Peta Struktur Geologi
- SA : Peta Sumber Air
- JA : Peta Jalan Akses
- AM : Peta Area Pemukiman
- MP : Peta Area Manifestasi Permukaan
- CB : Peta Area Cagar Budaya

Gambar 10. Diagram Alir Integrasi Data Spasial untuk pembuatan Peta Area Rekomendasi Lokasi Tapak Sumur Eksplorasi Panas Bumi



SISTEM PANAS BUMI CISOLOK CISUKARAME

Hasil survei geologi menunjukkan bahwa sistem panas bumi Cisolok-Cisukarame merupakan sistem vulkanik *medium - high terrain*. Sumber panas diperkirakan berasal dari sisa aktivitas Gunung Halimun yang berumur Kuartar.

Pola struktur yang berkembang berupa sesar berarah utara-selatan dan sesar berarah barat daya-timur laut. Struktur ini mengontrol munculnya manifestasi mata air panas dan tanah beruap dan merupakan indikasi permeabilitas di daerah ini (Gambar 11).

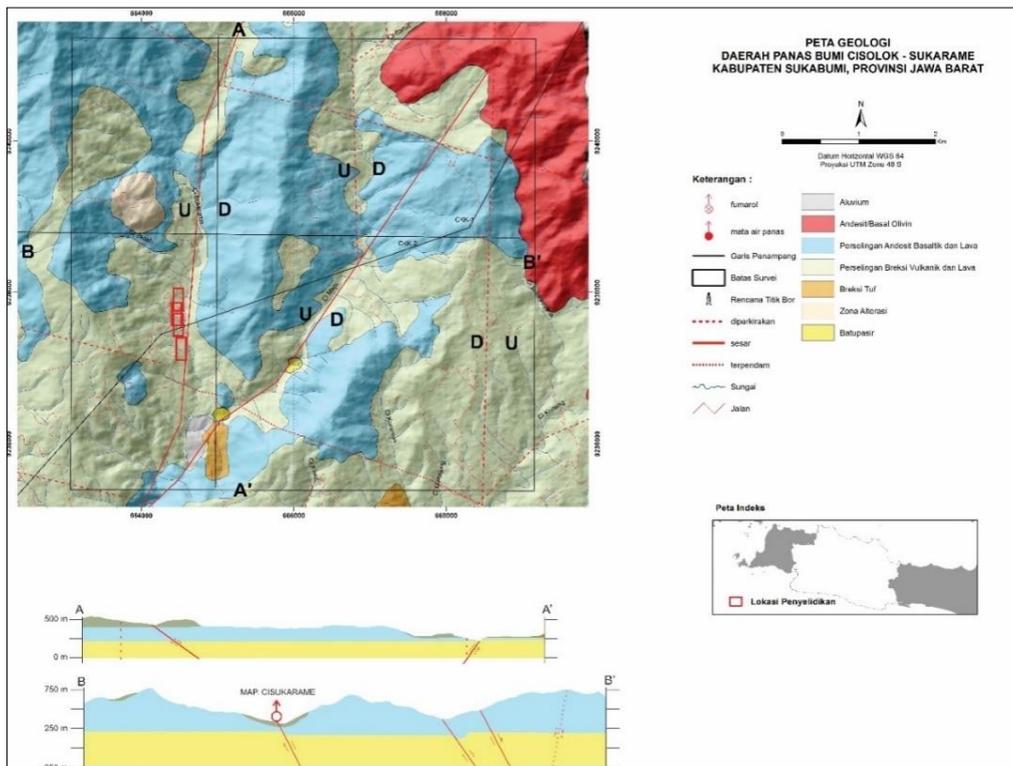
Suhu air dari mata air panas di Cisukarame mencapai titik didih (101°C). Dari analisis kimia menunjukkan bahwa fluida tersebut berasal dari reservoir dominasi air dengan pH netral dan estimasi suhu reservoir berkisar 200°C s.d. 235°C .

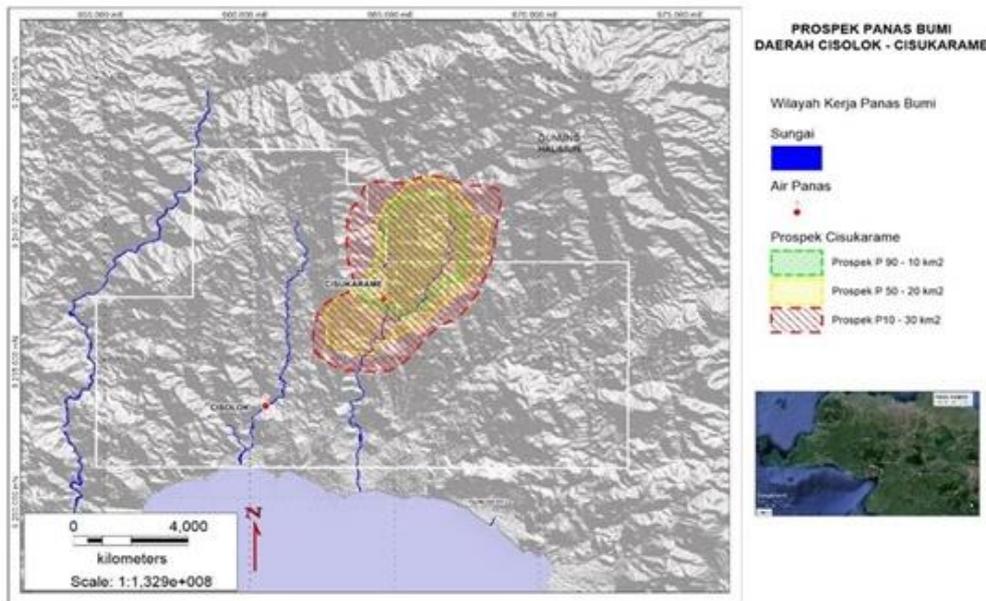
Data tahanan jenis menunjukkan adanya zona reservoir berada di bawah lapisan penudung atau lapisan batuan konduktif di

Daerah Cisolok dan Cisukarame. Estimasi kedalaman puncak reservoir berkisar 700m hingga 1.900m. Puncak reservoir terdangkal berada di area bagian tengah atau di sekitar Bukit Ci Arca.

Hasil survei geologi, geokimia dan geofisika di daerah panas bumi Cisolok-Cisukarame telah memberikan informasi mengenai keberadaan area prospek, sistem panas bumi dan estimasi besarnya sumber daya energi yang terkandung di dalamnya (Gambar 12). Area prospek ini yang digunakan sebagai rekomendasi teknis lokasi pengeboran eksplorasi panas bumi yang merupakan lanjutan dari tahapan eksplorasi.

Area prospek panas bumi dalam studi ini adalah area prospek P₁₀ terletak di sekitar Bukit Ci Arca, Sukarame dan Sinarasa dengan luas 10 km² hingga 30 km². Perhitungan volumetrik menggunakan simulasi Monte Carlo didapatkan estimasi sumberdaya sebesar 22 MW_e hingga 81 MW_e dengan P₅₀ sekitar 45 MW_e (Anonim, 2021).





Gambar 12. Peta Area Prospek Panas Bumi Daerah Cisulok-Cisukarame (Anonim, 2021)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum studi ini dilakukan telah ditentukan 2 (dua) lokasi tapak sumur dan pengeboran satu sumur pada Daerah Cisulok-Cisukarame ini. Dua lokasi tapak yaitu CKK-1 dan CKK-2 yang berada di sebelah timur-laut dan timur area prospek. Sedangkan pengeboran sumur CKK-1A dilakukan pada tapak sumur CKK-1. Sumur tersebut merupakan sumur *slimhole* dengan kedalaman kurang dari 900 meter dari 2.000m yang direncanakan. Dengan kedalaman tersebut, pengeboran di CKK-1A belum mencapai kedalaman reservoir yang diperkirakan berada pada kedalaman 1.250-1.750 meter.

Dalam studi ini dilakukan perhitungan ulang besar sumber daya dengan pendekatan monte carlo dengan asumsi Daerah Cisulok-Cisukarame merupakan sistem panas bumi dengan suhu menengah. Penghitungan ulang menghasilkan sumber daya panas bumi sebesar 25 – 95 MW_e dengan P₅₀ sebesar 52 MW_e dan nilai rata-rata sebesar 56 MW_e (Lampiran 1). Selanjutnya, dilakukan perhitungan per satuan luas prospek yaitu untuk luas prospek maksimum, *most-likely* dan minimum. Hasil perhitungan dengan menggunakan parameter luas tersebut

didapatkan sumber daya sebesar 83 MW_e, 48 MW_e, dan 35 MW_e. Sumber daya tersebut didapat dengan ketebalan reservoir berbeda berdasarkan kedalaman puncak reservoir. Interval ketebalan untuk luas prospek maksimum, *most-likely* dan minimum secara berturut-turut adalah 550-1.750 meter, 750-1.750 meter, dan 1.250-1750 meter untuk masing-masing luas.

Tapak Sumur CKK-1 dan CKK-2 berada di area prospek *most-likely*, sedangkan CKK-2 berada di area prospek minimum. Jadi apabila target Sumur CKK-1 berhasil dilakukan maka dapat mengkonfirmasi keberadaan sumber daya panas bumi pada area *most-likely* prospek tersebut. Sedangkan jika Sumur CKK-2 berhasil sesuai target, maka sumur ini dapat mengkonfirmasi sumber daya pada area minimum.

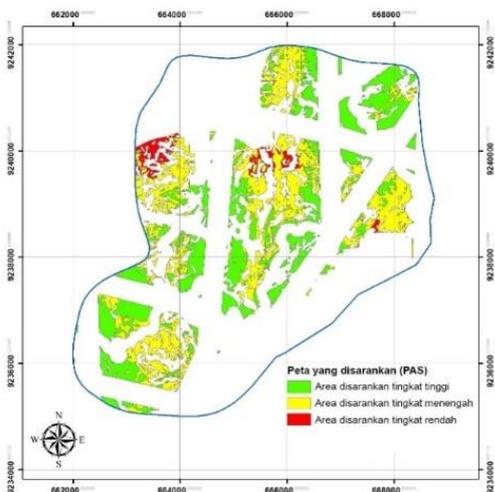
Area Yang Disarankan Untuk Tapak Sumur Eksplorasi Panas Bumi (PAS)

Gambar 13 adalah Peta area yang disarankan untuk tapak sumur eksplorasi panas bumi (PAS) yang merupakan area prioritas untuk lokasi tapak sumur dengan tiga tingkatan yaitu area yang disarankan kelas tingkat tinggi, menengah dan rendah. Peta ini merupakan hasil reklasifikasi irisan

lima peta area bufer yaitu KL, PR, SG, SA dan JA.

Total luas PAS untuk lokasi tapak sumur tidak terlalu luas hanya 8,82 km² atau 27,4% dari luas area prospek. Rincian luas untuk masing-masing kelas adalah PAS kelas tingkat tinggi (4,15 km² ~ 12,9%), PAS kelas tingkat menengah (4,31 km² ~ 13,36%) dan PAS kelas tingkat rendah (0,37 km² ~ 1,14%).

Area yang dapat memenuhi kriteria besaran lima (5) parameter ini tidak terlalu luas. Luas area ini selanjutnya akan dikurangi dengan area berbahaya. Area berbahaya ini merupakan area yang tidak disarankan untuk lokasi bangunan permanen. Areanya ditunjukkan dengan area berwarna merah pada **Gambar 2** sampai dengan **Gambar 6**. PAS ini tersebar merata di area prospek kecuali di bagian barat laut dan timur. Hal ini disebabkan karena pada area bagian barat laut merupakan area yang tidak memiliki sebaran *BoC*, sedangkan bagian timur memiliki kedalaman *BoC* lebih dari 1.750 meter. Kedua area tersebut dianggap tidak memenuhi kriteria area yang tidak disarankan atau terlarang.

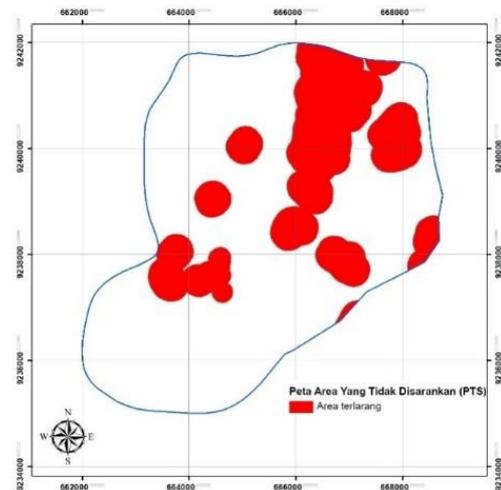


Gambar 13. Peta Area Yang Disarankan (PAS) untuk tapak sumur eksplorasi panas bumi Daerah Cisolak-Cisukarame

Peta Area Yang Tidak Disarankan Untuk Tapak Sumur Eksplorasi Panas Bumi (PTS)

Gambar 14 merupakan peta area yang tidak disarankan yang menggambarkan area terlarang untuk lokasi tapak sumur berdasarkan 3 parameter pembatas yaitu AM, MP dan CB. Luas AM mencapai 25% dari luas area prospek atau seluas 8,33 km², sedangkan parameter pembatas yang lain memiliki luas hanya kurang dari 2%.

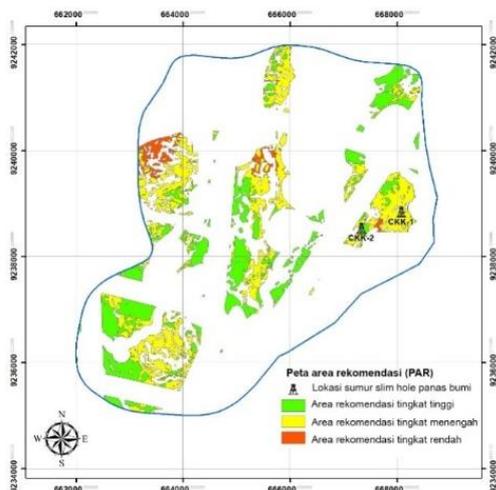
Hasil akhir studi ini adalah Peta Area Rekomendasi (PAR) untuk lokasi tapak sumur eksplorasi panas bumi sebagaimana dilihat pada **Gambar 15**. PAR ini merupakan hasil pengurangan PAS dengan PTS yang telah di reklasifikasikan dengan tiga tingkat kategori. Luas keseluruhan area PAR ini adalah 6,31 km² atau 19,62 % dari total prospek area P₉₀. Luas area PAR ini berkurang sekitar 28% dari luas PAS karena pengurangan area PTS.



Gambar 14. Peta Area Yang Tidak Disarankan (PTS) untuk tapak sumur eksplorasi panas bumi Daerah Cisolak-Cisukarame

Sebelum studi ini telah dilakukan penentuan dua lokasi tapak sumur pada area Cisolak-Cisukarame ini, yaitu CKK-1 dan CKK-2 (**Gambar 15**). Pada area tapak sumur CKK-1 telah dilakukan pengeboran sumur *slimhole* dengan kedalaman 900 meter. Lokasi CKK-1 berada pada area rekomendasi tingkat menengah sedangkan CKK-2 berada pada area rekomendasi tingkat tinggi.

Berdasarkan parameter-parameter *input*, lokasi CKK-1 dan CKK-2 berada pada kelas yang sama kecuali untuk SA atau jarak dari sumber air. CKK-1 berada pada kelas 2 sedangkan CKK-2 pada kelas 3. Untuk parameter PR, keduanya berada pada lokasi yang tidak ideal yaitu kelas 1 yang memiliki batas kedalaman antara 1.250 sampai dengan 1.750 meter. Berdasarkan hal tersebut maka total kedalaman vertikal sumur pada lokasi tersebut akan didesain antara 1.500 – 2.000 meter. Jadi pengeboran sumur *slimhole* pada CKK-1 belum menembus lapisan batuan yang dianggap sebagai batuan reservoir. Selain itu, meskipun CKK-2 berada pada area rekomendasi tingkat tinggi, namun berdasarkan **Gambar 16 (b)** tapak sumur CKK-2 juga tidak memiliki luas ideal.



Gambar 15. Peta Area Rekomendasi (PAR) untuk tapak sumur eksplorasi panas bumi Daerah Cisulok-Cisukarame

Peta Area Rekomendasi Untuk Tapak Sumur Eksplorasi Panas Bumi (PAR)

Gambar 16 (a) dan (b) merupakan peta area rekomendasi (PAR) untuk tapak sumur eksplorasi panas bumi Daerah Cisulok-Cisukarame grid jala 120x120 meter dan 50x50 meter. Dengan ukuran grid jala 120 meter, PAR menghasilkan delapan area kluster besar dan lima area kluster kecil. Sedangkan dengan ukuran grid jala lebih kecil yaitu 50 meter akan menghasilkan jumlah kluster yang sama

ditambah setidaknya lima (5) kluster sangat kecil. Studi dari Purba *et al.* (2019) menjadi dasar pengambilan ukuran grid jala bahwa ukuran tapak sumur lubang standar adalah 120x70 meter dan sumur *slimhole* 50x40 meter.

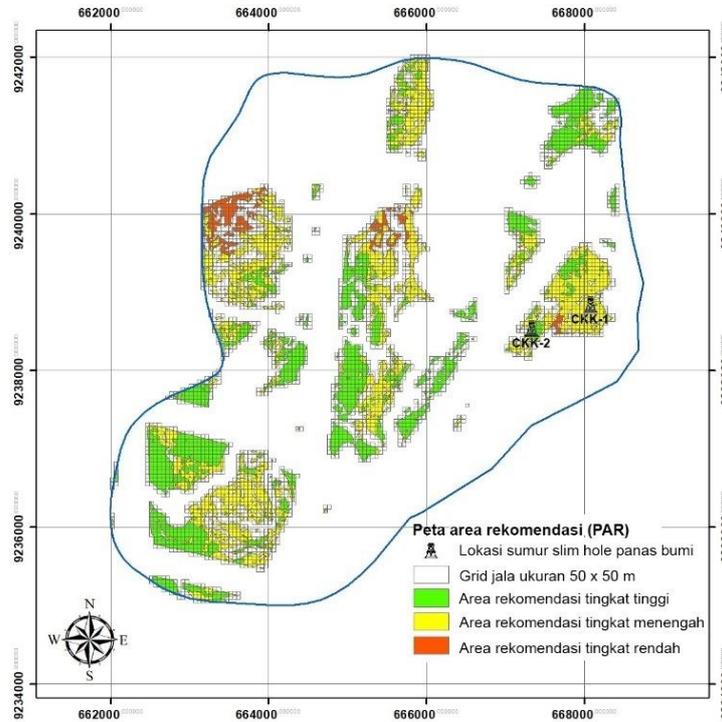
Dengan mempertimbangkan peta hasil akhir (**Gambar 16**) dan peta parameter *input* (**Gambar 2, 3, 4, 5 dan 6**), lokasi tapak sumur berada di area bagian timur laut area prospek Cisulok-Cisukarame. Namun jika hanya berdasarkan peta pada **Gambar 16**, maka disarankan lokasi tapak sumur berada pada bagian timur laut, bagian tengah dan bagian barat daya area prospek dengan kategori area rekomendasi tingkat tinggi. Dengan pertimbangan peta kemiringan lahan (**Gambar 3**), bagian barat daya dan timur laut lebih direkomendasikan. Sedangkan jika mempertimbangkan **Gambar 2** yaitu peta kedalaman puncak reservoir, bagian timur laut dan bagian tengah prospek memiliki kedalaman kurang dari 750 meter, sedangkan bagian barat daya memiliki kedalaman *BoC* lebih dari 750 meter sampai dengan 1.250 meter.

Hasil Akhir Area Rekomendasi (PAR) untuk tapak sumur eksplorasi panas bumi Daerah Cisulok-Cisukarame ini dapat direkomendasikan untuk dijadikan acuan penentuan lokasi tapak sumur dan perencanaan kegiatan survei lapangan selanjutnya. Hasil penentuan lokasi tapak sumur eksplorasi panas bumi masih perlu dilakukan kegiatan verifikasi lapangan untuk data-data yang perlu di perbaharui seperti area pemukiman dan jalan akses. Jika digunakan untuk perencanaan kegiatan survei lapangan seperti survei geoteknik dan perencanaan, dan survei infrastruktur, maka peta ini sudah cukup dapat membantu seperti desain survei fotogrametri dan lidar.

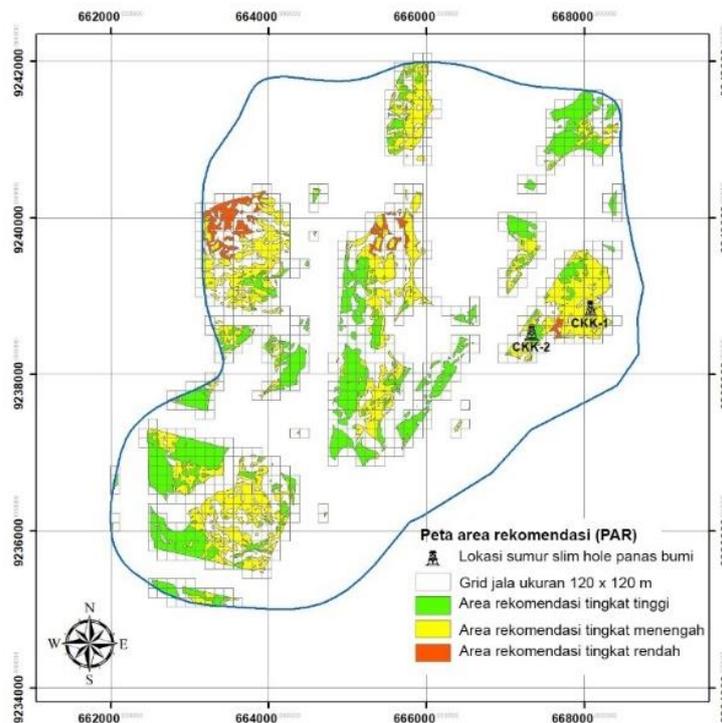
Dalam melakukan analisis selain menggunakan PAR ini, masih perlu mempertimbangkan hasil peta parameter *input*. Hal ini dikarenakan semua parameter *input* memiliki bobot yang sama, sehingga dianggap memiliki bobot

kepentingan yang sama. Hal ini mengakibatkan area dengan kelas yang sama pada PAR memiliki kualitas yang

berbeda seperti diuraikan pada analisis di atas.



(a)



(b)

Gambar 16. Peta area rekomendasi (PAR) untuk tapak sumur eksplorasi panas bumi Daerah Cisulok-Cisukarame, (a) Peta dengan grid jala ukuran 50x50-meter, dan (b) Peta dengan grid jala ukuran 120x120-meter.

KESIMPULAN

Dengan mengintegrasikan delapan (8) parameter yang akan mempengaruhi besarnya biaya pengeboran, yaitu Peta Area Prospek (AP), Peta Kemiringan Lahan (KL), Peta Area Kedalaman Puncak Reservoir (PR), Peta Struktur Geologi (SG), Peta Sumber Air (SA), Peta Jalan Akses (JA), Peta Area Pemukiman (AM), Peta Area Manifestasi Permukaan (MP), dan Peta Area Cagar Budaya (CB), dihasilkan Peta Area Rekomendasi (PAR) untuk tapak sumur eksplorasi panas bumi.

Total luas peta area rekomendasi (PAR) untuk tapak sumur eksplorasi panas bumi Daerah Cisolak-Cisukarame sekitar 6,31 km² atau setara dengan 19,62 % luas area prospek P₉₀. Dengan menggunakan grid jala (*fishnet*) ukuran 120 meter, PAR tersebut menghasilkan delapan area kluster besar dan lima area kluster kecil yang cocok sebagai tapak sumur lubang standar. Sedangkan dengan ukuran grid jala 50 meter menghasilkan jumlah kluster yang sama ditambah setidaknya lima kluster sangat kecil.

Hasil studi ini dapat dijadikan acuan sebagai rekomendasi area untuk dijadikan lokasi tapak sumur dan perencanaan kegiatan survei lapangan selanjutnya seperti survei geoteknik dan perencanaan dan survei infrastruktur. Untuk kegiatan selanjutnya, perlu dilakukan verifikasi/tinjauan lapangan tambahan terutama untuk data-data yang dinamis seperti area pemukiman dan jalan akses.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi c.q. 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 yang telah memberikan koreksi serta saran dalam perbaikan tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abuzied, S.M., Kaiser, M.F., Shendi, E.A.H. and Abdel-Fattah, M.I., 2020. Multi-criteria decision support for geothermal resources exploration based on remote sensing, GIS and geophysical techniques along the Gulf of Suez coastal area, Egypt. *Geothermics*, 88, p.101893.
- Alias, M.A., Hashim, S.Z.M. and Samsudin, S., 2008. Multi criteria decision making and its applications: a literature review. *Jurnal Teknologi Maklumat*, 20(2), pp.129-152.
- Anonim, 2021. *Laporan Integrasi Data Akuisisi Geosains Daerah Panas Bumi Bittuang, Cisolak-Cisukarame, Nage, Gunung Endut, Sembalun, Gunung Tampomas, Gunung Ciremai, dan Daerah Panas Bumi Marana*. Bandung.
- Baffoe, P.E. and Sarpong, D., 2016. Selecting suitable sites for wind energy development in Ghana. *Ghana Mining Journal*, 16(1), pp.8-20.
- Badan Informasi Spasial (BIG), 2023. Indonesia Geospatial Portal.
- Brown, K.L., 2000; Environmental Safety and Health Issues, in *Geothermal Development: WGC2000 Short Courses*, p. 100.
- Carranza, E.J.M. et al., 2008. Spatial data analysis and integration for regional-scale geothermal potential mapping, West Java, Indonesia, *Geothermics*, 37(3), pp. 267–299.
- Coro, G. and Trumpy, E., 2020. Predicting geographical suitability of geothermal power plants, *Journal of Cleaner Production*, 267, p. 121874.
- Dezayes, C., Famin, V., Tourlière, B., Baltassat, J.M. and Bénard, B., 2022. Potential areas of interest for the development of geothermal energy in La Réunion Island based on GIS analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 421, p.107450.

- García-Estrada, G.H., López-Hernández, A. and León, J.L.Q., 2008. Selection of new drill sites using a Geographic Information System (GIS) at Los Azufres, Mexico, *Geotermia*, p. 43.
- Gouareh, A., Settou, N., Khalfi, A., Recioui, B., Negrou, B., Rahmouni, S. and Dokkar, B., 2015. GIS-based analysis of hydrogen production from geothermal electricity using CO₂ as working fluid in Algeria. *International journal of hydrogen energy*, 40(44), pp.15244-15253.
- Jara-Alvear, J., De Wilde, T., Asimbaya, D., Urquizo, M., Ibarra, D., Graw, V. and Guzmán, P., 2023. Geothermal resource exploration in South America using an innovative GIS-based approach: A case study in Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 122, p.104156.
- Jensen, J.R. and Jensen, R.R., 2012. *Introductory geographic information systems*. Pearson Higher Ed.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2007. *Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1937 K/30/MEM/2007 tentang Penetapan Wilayah Kerja Pertambangan Panas Bumi di Daerah Cisolok Cisukarame Kabupaten Sukabumi Provinsi Jawa Barat*.
- Kementerian Negara Lingkungan Hidup, 1996. *Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor Kep-48/Menh/11/1996 tentang Baku Tingkat Kebisingan Menteri Negara Lingkungan Hidup*.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2015. *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 28/PRT/M/2015 tentang Penetapan Garis Sempadan Sungai dan Garis Sempadan Danau*. 28/PRT/M/2015.
- Kiavarz, M. and Jelokhani-Niaraki, M., 2017. Geothermal prospectivity mapping using GIS-based Ordered Weighted Averaging approach: A case study in Japan's Akita and Iwate provinces, *Geothermics*, 70, pp. 295–304.
- Manzella, A., Botteghi, S., Flovenz, O., Gola, G., Hersir, G.P., Limberger, J., Liotta, D., Santilano, A., Trumpy, E. and van Wees, J.D., 2019. Mapping super-critical geothermal resources in Europe. In *Proceedings of the European Geothermal Congress 2019* (pp. 1-5).
- Mustofa, S.A., Hadi, M.N. and Candra, 2021; *Survei Rinci Geologi Daerah Panas Bumi Cisolok-Cisukarame Kabupaten Sukabumi Provinsi Jawa Barat*. Bandung.
- Noorollahi, Y. et al., 2007a. GIS model for geothermal resource exploration in Akita and Iwate prefectures, northern Japan, *Computers & geosciences*, 33(8), pp. 1008–1021.
- Noorollahi, Y. et al., 2007b. GIS model for geothermal resource exploration in Akita and Iwate prefectures, northern Japan, *Computers & Geosciences*, 33(8), pp. 1008–1021.
- Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H. and Tanaka, T., 2008. GIS integration model for geothermal exploration and well siting. *Geothermics*, 37(2), pp.107-131.
- Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H. and Tanaka, T., 2008. GIS integration model for geothermal exploration and well siting. *Geothermics*, 37(2), pp.107-131.
- Noorollahi, Y., Ghasempour, R. and Jalilinasrabady, S., 2015. A GIS based integration method for geothermal resources exploration and site selection, *Energy Exploration & Exploitation*, 33(2), pp. 243–257.

- Nugraha, H.S.Permana, L.A. and Sukaesih, 2021. Analisis Citra Satelit Landsat 8 dan DEMNAS Untuk Identifikasi Prospek Panas Bumi di Kabupaten Aceh Tengah, Provinsi Aceh, *Buletin Sumber Daya Geologi*, 16(3), pp. 166–184.
- Omwenga, B., Katana, C., Rutto, E. and Musyoka, C., 2019. Integration of Geological Modelling Approach and GIS in Exploration and Well Targeting in the Olkaria Geothermal Area.
- Omwenga, B.M., 2020. Geothermal Well Site Suitability Selection Using Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing: Case Study of the Eburru Geothermal Field. In *45th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering* (Vol. 1, pp. 1-6).
- Ozsahin, D.U., Gökçekus, H., Uzun, B. and LaMoreaux, J.W. eds., 2021. *Application of multi-criteria decision analysis in environmental and civil engineering* (pp. 37-41). Cham, Switzerland: Springer.
- Pusat Pengelolaan dan Penyebarluasan Informasi Geospasial Badan Informasi Geospasial (BIG), 2023. *Ina-Geoportal*.
- Sadeghi, B. and Khalajmasoumi, M., 2015. A futuristic review for evaluation of geothermal potentials using fuzzy logic and binary index overlay in GIS environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, pp.818-831.
- Yalcin, M. and Gul, F.K., 2017. A GIS-based multi criteria decision analysis approach for exploring geothermal resources: Akarcay basin (Afyonkarahisar), *Geothermics*, 67, pp. 18–28.
- Yousefi, H. and Ehara, S., 2008. GIS Integration Method for Geothermal Power Plant Siteing in Sabalan Area, NW Iran, in *Proceedings, Thirty-Third Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University*, pp. 28–30.
- Yousefi-Sahzabi, A., Sasaki, K., Yousefi, H., Pirasteh, S. and Sugai, Y., 2011. GIS aided prediction of CO2 emission dispersion from geothermal electricity production. *Journal of Cleaner Production*, 19(17-18), pp.1982-1993.
- Zaher, M.A., Saibi, H., Mansour, K., Khalil, A. and Soliman, M., 2018. Geothermal exploration using airborne gravity and magnetic data at Siwa Oasis, Western Desert, Egypt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp.3824-3832.

Diterima	: 25 Agustus 2023
Direvisi	: 4 September 2023
Disetujui	: 30 November 2023