



Analisa Geologi Struktur Lapangan Geothermal Sarulla

Citra Wahyuningrum

Teknik Perminyakan, Fakultas Teknik, Universitas Bhayangkara Jaya

Email : citra.wahyuningrum@dsn.ubharajaya.ac.id

Kevin Kevin

Teknik Perminyakan, Fakultas Teknik, Universitas Bhayangkara Jaya,

Email: 202210257003@mhs.ubharajaya.ac.id

Faqih Badruzzaman

Teknik Perminyakan, Fakultas Teknik, Universitas Bhayangkara Jaya

Email: 202110257001@mhs.ubharajaya.ac.id

Abstract. *Indonesia is a country with great potential geothermal energy resources. Geothermal resources in Sumatra are mostly located along magmatic arcs that correlate with the seismically active Sumatran Fault. One of the unexploited geothermal resources is located around the Tarutung basin, south of Lake Toba, North Sumatra. The presence of an open fracture or fracture correlates very well with depth. Geological structures consisting of faults, lineages, and volcanic features such as tuff-ring structures or maars were identified as a combination of these methods namely Interpretation of topographic maps and satellite imagery (ASTER DEM) and geological mapping and field verification. In the withdrawal of the geological structure of the Sarulla Geothermal Field there are tectonic effects in the form of transpression, transtension and lineation zones. This is due to tectonic activity from the Great Sumatra Fault in its fault zone. The model along the Sarulla basin also consists of three main layers that form the background structure for the shallow graben located in the center. Sarulla graben seems to reflect a simpler fault structure compared to the more complex Tarutung tug basin. Sarulla graben seems to reflect a simpler fault structure compared to the more complex Tarutung tug basin. Sarulla graben has been formed by an almost perpendicular extension to a weak fault on the Great Sumatran Fault (Semangko) which forms a pull apart basin as a permeable exit zone of Sarulla area manifestation. The geothermal geological structure of Sarulla is in the form of transpression, transtension and circular feature zones of the Hopong Caldera which are the effects of volcanic activity. Extensional dominated play type is a type of geothermal system owned by Sarulla geothermal where reservoir permeability is controlled based on faults and fracturing with heat sources from magmatism activity in the Tarutung basin with clay alteration Caprock. When the decrease in NDVI is very drastic and the temperature increases, it can be concluded that environmental changes occur in these locations in the category of degraded land. Land change/destruction can disturb humans who are around*

Keywords : NDVI, Fault, Geology Structure

Abstrak. Indonesia merupakan negara dengan potensi sumber daya energi panas bumi yang besar. Sumber daya panas bumi di Sumatera sebagian besar terletak di sepanjang busur magmatik yang berkorelasi dengan Sesar Sumatera yang aktif secara seismik. Salah satu sumber panas bumi yang belum dieksplorasi terletak di sekitar cekungan Tarutung, sebelah

Received Mei 30, 2022; Revised Juni 25, 2023; Accepted Juli 12, 2023

* Citra Wahyuningrum, citra.wahyuningrum@dsn.ubharajaya.ac.id

selatan Danau Toba, Sumatera Utara. Adanya patahan atau fraktur terbuka berkorelasi sangat baik dengan kedalaman. Struktur geologi yang terdiri dari patahan, garis keturunan, dan fitur vulkanik seperti struktur *tuff-ring* atau *maars* diidentifikasi kombinasi dari metode ini yaitu Interpretasi peta topografi dan citra satelit (ASTER DEM) dan pemetaan geologi dan verifikasi lapangan. Pada penarikan struktur geologi Lapangan Geothermal Sarulla terdapat efek tektonik berupa zona transpresi, transtensi dan liniasi. Hal ini diakibatkan aktifitas tektonik dari Sesar Besar Sumatera pada zona sesarnya. Model di sepanjang cekungan Sarulla juga terdiri dari tiga lapisan utama yang membentuk struktur latar belakang untuk graben dangkal yang terletak di tengah. Sarulla graben tampaknya mencerminkan struktur patahan yang lebih sederhana dibandingkan dengan cekungan tarik Tarutung yang lebih kompleks. Sarulla graben telah dibentuk oleh ekstensi hampir tegak lurus terhadap patahan yang lemah pada Sesar Besar Sumatera (Semangko) yang membentuk *pull apart basin* sebagai zona permeable keluarnya manifestasi area Sarulla. Struktur geologi geothermal Sarulla berupa zona transpresi, transtensi dan circular feature dari Kaldera Hopong yang merupakan efek dari aktifitas vulkanis. *Extensional dominated play type* merupakan tipe sistem geothermal yang dimiliki oleh geothermal Sarulla dimana permeabilitas reservoir dikendalikan berdasarkan patahan dan rekahan dengan sumber panas dari aktifitas magmatisme pada cekungan Tarutung dengan *Caprock* alterasi lempungan. Ketika penurunan NDVI sangat drastis dan suhu meningkat, dapat disimpulkan bahwa perubahan lingkungan terjadi di lokasi-lokasi tersebut dalam kategori lahan terdegradasi. Perubahan/kerusakan lahan dapat mengganggu manusia yang beradadi sekitar.

Kata kunci : NDVI, Sesar ,Struktur Geologi

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara dengan potensi sumber daya energi panas bumi yang besar membentang dari provinsi paling barat, Aceh-Sumatera Utara hingga provinsi paling timur, Papua Barat. Sumber daya panas bumi di Sumatera sebagian besar terletak di sepanjang busur magmatik yang berkorelasi dengan Sesar Sumatera yang aktif secara seismik. Salah satu sumber panas bumi yang belum dieksploitasi terletak di sekitar cekungan Tarutung, sebelah selatan Danau Toba, Sumatera Utara. Tarutung adalah ibu kota dari kabupaten Tapanuli Utara. Sumber panas bumi lain ditemukan di Tapanuli Utara terletak di sekitar graben Sarulla (lebih jauh ke selatan cekungan Tarutung) yang memiliki telah dikontrak ke perusahaan panas bumi untuk eksploitasi. Sumber daya panas bumi di Tarutung diwakili oleh manifestasi panas bumi yang menonjol (Sipoholon, Pemandian air panas Hutabarat, dan Panabungan)

Sejak Mei 1993 sampai Maret 1998 *Unocal* melakukan program eksplorasi yang luas yang dirancang untuk menemukan dan mengevaluasi sistem panas bumi komersial dalam area kontrak. Tahap awal program eksplorasi melibatkan metode geologi dan geokimia. Ini termasuk pemetaan litologi, perubahan, dan struktur geologi serta

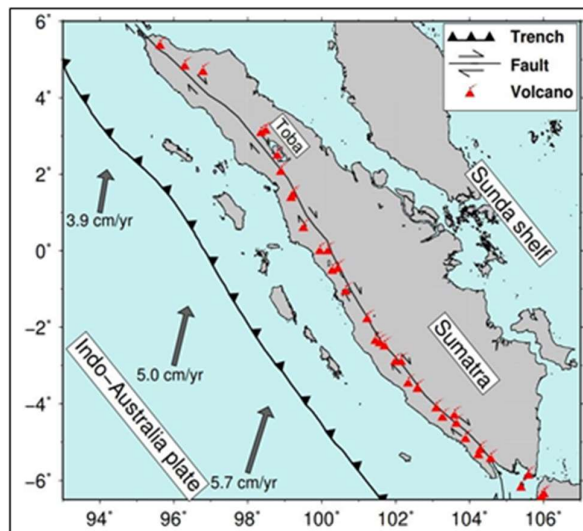
menemukan, mengambil sampel, dan menganalisis fluida dari semua fitur termal permukaan di dalam blok. Tahap kedua terdiri dari program geofisika yang memanfaatkan survei gravitasi, elektromagnetik domain waktu (TDEM) dan *magnetotelluric* (MT). Dua metode terakhir digunakan untuk menentukan struktur resistivitas listrik bawah permukaan di atas area survei. Dua program eksplorasi ini mengidentifikasi empat prospek utama dalam wilayah kontrak. Tahap eksplorasi ketiga melibatkan pengeboran 13 sumur dalam di tiga prospek prioritas tertinggi.

Wilayah Kerja Sarulla berdimensi sekitar 15 x 63 km, memanjang ke arah NW-SE, dan terletak di antara kota Padangsidempuan dan Tarutung di negara bagian Sumatera Utara. Akses ke dan di dalam wilayah kontrak relatif baik, karena Jalan Raya Trans-Sumatera membentang sepanjang jalannya, dan jalan lokal membentang dari jalan raya ke beberapa daerah termal. Secara fisiografis, daerah ini dapat dibedakan menjadi dua wilayah terpisah: dataran tinggi pegunungan yang kasar di Pegunungan Barisan, dan dataran rendah dan datar di dalam graben Sarulla yang membentang di sepanjang poros pegunungan. Sungai Batang mengalir di sepanjang graben ini melalui bagian utara dan tengah dari area kontrak, dan kemudian memotong ngarai melalui busur vulkanik saat mengalir ke selatan dan barat ke Samudra Hindia.

Analisis persimpangan patahan sumur menunjukkan bahwa permeabilitas formasi yang tinggi dan kapasitas produksi sumur dan kapasitas sumur injeksi yang tinggi dapat dikaitkan dengan beberapa kesalahan dan zona fraktur terkait. Adanya patahan atau fraktur terbuka berkorelasi sangat baik dengan kedalaman *partial loss circulation* (PLC) dan *total loss circulation* (TLC) dan zona umpan yang dikenali dari profil suhu yang diambil selama kehilangan air dan survei tekanan-suhu panas (PT) berikutnya. Struktur geologi yang terdiri dari patahan, garis keturunan, dan fitur vulkanik seperti struktur sektor-runtuh dan *tuff-ring* atau *maars* diidentifikasi kombinasi dari metode ini yaitu Interpretasi peta topografi dan citra satelit (ASTER DEM) dan pemetaan geologi dan verifikasi lapangan.

TEKTONIK & GEOLOGI REGIONAL

Sistem panas bumi Sarulla yang didominasi air bersuhu tinggi dikaitkan dengan Sarulla graben yang merupakan cekungan *Plio-Pleistosen* komposit yang dikembangkan di sepanjang barat laut yang mencolok, sesar Sumatra *dextral-slip* di wilayah di mana patahan tersebut bertepatan dengan busur vulkanik Sumatra. Patahan ini dihasilkan karena adanya zona geser besar di sepanjang busur magmatik yang dipicu oleh penetrasi miring lempeng samudera Indo-Australia di bawah lempeng Sunda. Di sepanjang Jawa, lempeng subduksi bergerak hampir ortogonal ke parit dan menjadi lebih miring di sepanjang Sumatra dan hampir sejajar di sepanjang wilayah Andaman. Gerakan lempeng relatif menyebabkan subduksi curam di sepanjang pulau Jawa dan menjadi lebih dangkal di sepanjang Sumatera utara dan wilayah Andaman. Geometri zona subduksi juga dapat dipengaruhi oleh usia dan tingkat konvergensi lempeng.



Gambar 1. Subduksi miring mengakibatkan adanya strike-slip Sumatra patahan di sepanjang gariskerak lemah terkait dengan keberadaan vulkanisme di sepanjang pulau

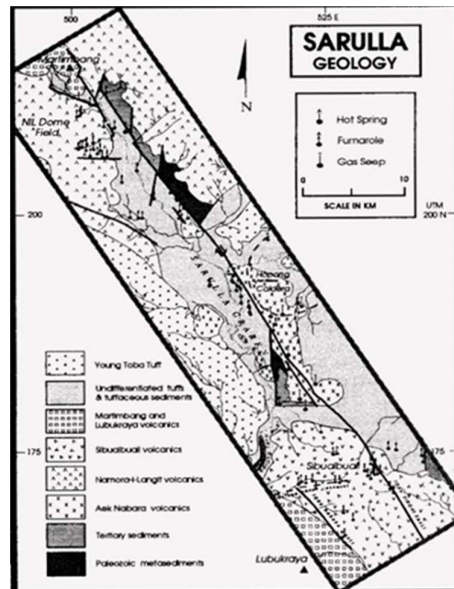
Lempeng samudera yang mensubduksi di bawah Sumatera memiliki umur 46-60 m.y dan menyatu dengan laju 6,81 cm/thn. Di sekitar bekas pusat penyebaran antara lempeng India dan Australia (Wharton ridge) bahan subduksi diamati lebih apung dan lebih tipis yang mungkin terkait dengan beberapa mega letusan *supervolcano* Toba. Karena kerak samudera Indo-Australia menembus mantel, air yang terkandung dalam lempengan subduksi menurunkan suhu leleh mantel. Magma kemudian naik ke atas untuk menghasilkan busur vulkanik sejajar dengan palung Sunda. Sesar Sumatera *dextral slip*

sepanjang 1.900 km dibentuk untuk mengakomodasi komponen parit-paralel dari konvergensi miring antara lempeng Indo-Australia dan Sunda. patahan dihasilkan di sepanjang garis busur vulkanik yang melemah karena suhu tinggi yang terkait dengan magmatisme. Oleh karena itu sesar Sumatera berkorelasi dengan garis busur vulkanik dan geometri palung Sunda. Interaksi yang kompleks antara lempeng utama, subduksi, dan lempeng sliver telah menghasilkan beberapa patahan yang lebih kecil seperti sesar Batee dan Mentawai.

Sebagai konsekuensi dari keberadaan zona subduksi dan patahan Sumatera, Sumatera menjadi salah satu daerah yang paling aktif secara seismik di dunia. Dua jenis gempa bumi utama (dengan rentang magnitudo yang luas) adalah peristiwa sesar dorong pada zona subduksi, dan kejadian *strike-slip* pada sistem Sesar Sumatera. Setelah gempa *mega thrust* di Aceh 2004 dengan kekuatan SR 9,3 dan lainnya dengan kekuatan SR 8,5 di Nias, wilayah ini menjadi lebih aktif. Baru-baru ini, dua gempa bumi besar dengan kekuatan lebih besar dari SR 8,0 diikuti oleh gempa susulan di lepas pantai barat Sumatera utara seperti beberapa gempa *strike-slip* berbahaya juga terjadi di sepanjang Sesar Sumatera.

Sistem Sesar Sumatera dibagi menjadi 19 segmen utama meskipun diskontinuitas yang lebih kecil juga ada di sepanjang patahan. Sebagian besar segmen adalah *step over* dilatasi meskipun beberapa tikungan kontraksional juga terjadi. Sepanjang segmen utama gempa bumi kuat dan besar terjadi. Magnitudo maksimum gempa bumi berkorelasi dengan panjang segmen. Panjang segmen sebagian besar kurang dari 100 km dan hanya 2 segmen yang memiliki panjang 200 km. Karena segmentasi patahan, besarnya gempa cenderung lebih kecil dari SR $\sim 7,7$. Kemiringan konvergensi menghasilkan peningkatan *slip rate* patahan Sumatera ke arah barat laut. Tingkat slip di selat Sunda (bagian paling selatan Sumatera) adalah sekitar 6 mm / tahun dan meningkat menjadi 17 mm / tahun di Sumatera bagian tengah (10S-30N). Konvergensi dari kedua lempeng tersebut membentuk segmen *oblique* pembentukan busur vulkanik dan sistem transcurrent fault. Lapangan geothermal Sarulla terletak dalam Area Bukit Barisan yang memotong batas selatan Tumor Batak (125x250 km) dengan membentuk kubah elips. Busur vulkanik di Sumatera meliputi 11 gunung api yang dianggap tidak aktif atau dalam tahap fumarolik yang terpengaruh *Sumatera Fault System, strike-slip* berorientasi ke arah N30-40W.

Di permukaan, jenis batuan di sepanjang Sesar Sumatera berkorelasi dengan distribusi gunung berapi. Dari lintang sekitar 0⁰ ke selatan Sumatera, batuan vulkanik diamati di sepanjang patahan, berkorelasi dengan distribusi gunung berapi yang lebih padat. Sejumlah besar batuan vulkanik ditemukan di sekitar daerah Toba termasuk daerah Tarutung yang terkait dengan letusan gunung berapi super Toba sekitar 74.000 tahun yang lalu dan letusan kecil lainnya, seperti gunung berapi Hopong di selatan daerah Tarutung. Di wilayah dengan tidak adanya gunung berapi (30N hingga 4,70N) litologi didominasi oleh batuan sedimen Pliosen dan Eosen. Lebih ke utara di Aceh (4,70N hingga 60N) permukaan di sepanjang patahan Sumatera sebagian besar ditempati oleh jenis batuan yang lebih tua, misalnya formasi Jurassic Atas dan Kapur Bawah.

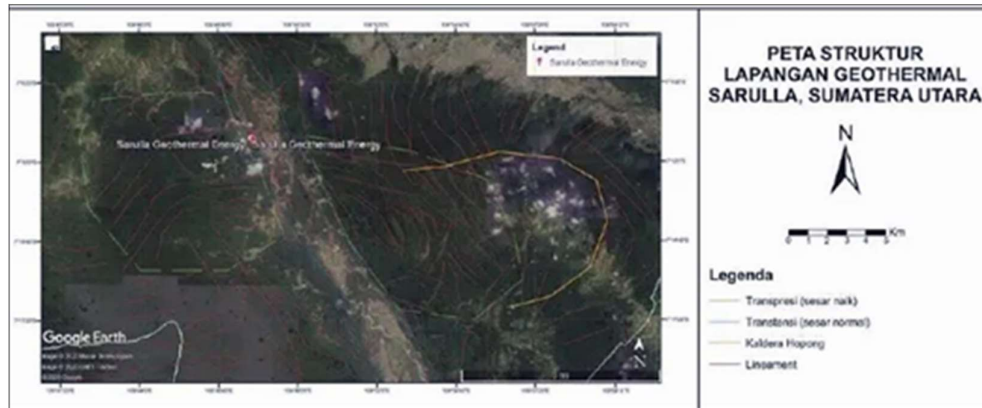


Gambar 2. Peta Geologi Area Sarulla

STRUKTUR GEOLOGI LAPANGAN GEOTHERMAL SARULLA

Geologi struktur area kontrak didominasi oleh vulkanisme Kuartar dan patahan *strike-slip*. Hal tersebut ditunjukkan pada batuan dasar kerak yang terangkat, terlipat, dan patahan, yang meliputi batuan metasedimen Paleozoikum, batuan intrusif Mesozoikum hingga Tersier, dan batuan sedimen Tersier, serta struktur kerak tua lainnya. Seperti disebutkan sebelumnya, rangkaian patahan paralel ini signifikan secara geotermal karena memberikan permeabilitas fraktur di wilayah upflow. Struktur bawah permukaan atau terkubur NW-SE yang sedang tren juga disimpulkan berdasarkan pengeboran, geologibawah permukaan, dan

data *modeling* reservoir.



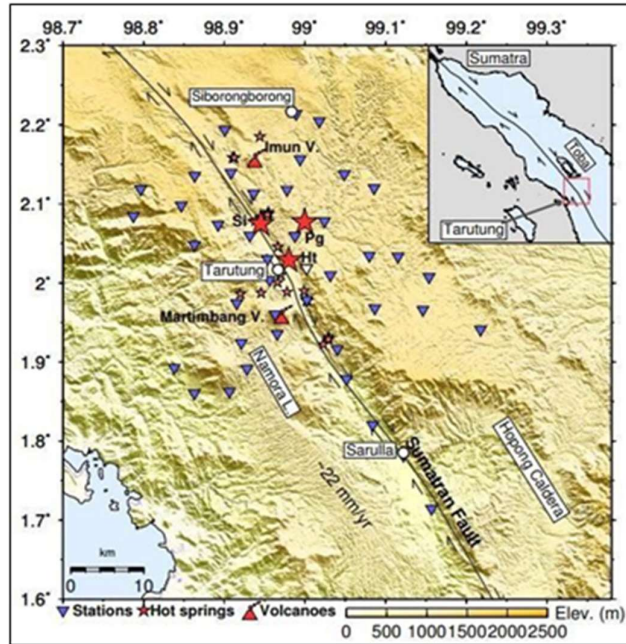
Gambar 3. Peta Struktur Geologi Lapangan Geothermal Sarulla

Pada penarikan struktur geologi Lapangan Geothermal Sarulla terdapat efek tektonik berupa zona transpresi, transtensi dan liniasi. Hal ini diakibatkan aktifitas tektonik dari Sesar Besar Sumatera pada zona sesarnya. Zona transpresi tercipta karena tekanan oleh pergerakan sesar datar manganan sehingga hasilnya adalah Bukit Barisan morfologi tinggian dan karena kompresi tercipta pada area regangan di bidang Sesar Besar Sumatera. Kemudian zona transtensi tersusun karena sesar normal yang mengarah utara-selatan membentuk liniasi pada pembentukan pegunungan dan lembah.

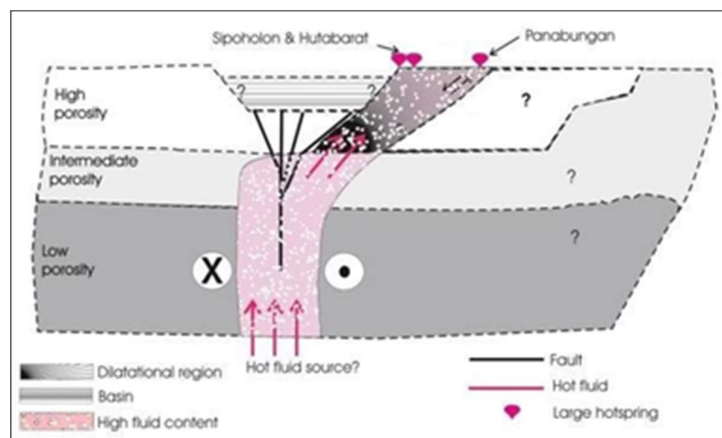
Model di sepanjang cekungan Sarulla juga terdiri dari tiga lapisan utama yang membentuk struktur latar belakang untuk graben dangkal yang terletak di tengah. Dengan mengasumsikan perubahan porositas dan diferensiasi petrologis dari gunung berapi yang melimpah batuan atas penataan vertikal model sebagai latar belakang. Sarulla graben tampaknya mencerminkan struktur patahan yang lebih sederhana dibandingkan dengan cekungan tarik Tarutung yang lebih kompleks. Sarulla graben telah dibentuk oleh ekstensi hampir tegak lurus terhadap patahan yang lemah.

Perubahan laju dan arah gerak lempeng Indo-Australia menyebabkan segmentasi *step-over* patahan Sumatera atas keberadaan cekungan Tarutung. Secara lebih rinci, ditemukan bahwa cekungan Tarutung terbentuk ketika cabang baru sesar Sumatera sedang menyelimuti di sisi barat kaldera Toba sebagai konsekuensi patahan yang lebih besar dari sistem sesar sebelumnya dan selanjutnya pembentukan kaldera Toba besar di wilayah *step-over* yang lebih tua. Di sepanjang wilayah Tarutung, terdapat tiga gunung berapi yang terletak dekat dengan garis patahan yaitu gunung berapi Imun, Helatoba, dan Dolok Martimbang. Wilayah Sarulla, beberapa aktivitas terkait vulkanik diamati seperti bidang kubah NIL (utara Sarulla)

dan kaldera Hopong berdiameter 9 km yang terletak di sisi timur graben Sarulla. Sepanjang patahan Sumatera, setengah dari geothermal fluid dikaitkan dengan cekungan *pull-apart* dan setengah lainnya terkait dengan aktivitas gunung berapi. Karena ada banyak gunung berapi dan kaldera yang dekat dengan cekungan tarik dan graben, keduanya, cekungan dan aktivitas vulkanik bersama-sama dapat memainkan peran penting dalam mengendalikan sistem panas bumi.



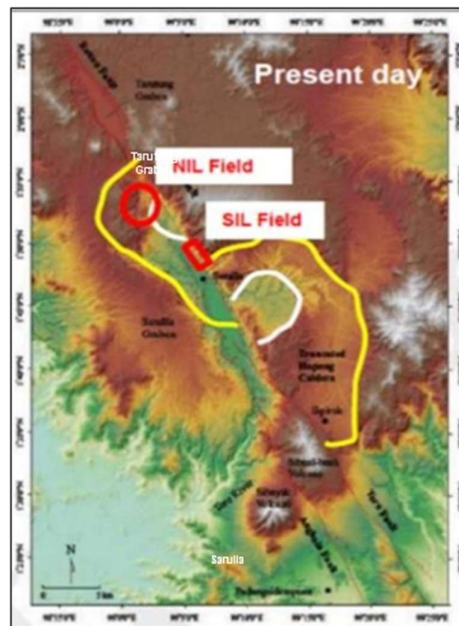
Gambar 4. Kawasan Tarutung terletak di sebelah selatan Danau Toba yang ditandai dengan adanya cekungan tarik Tarutung, graben Sarulla, kaldera Hopong, kubah lapangan NIL diantara Gunung Martimbang dan gunung berapi Imun, dan juga manifestasi panas bumi (mata air panas). Tiga manifestasi besar (ditunjukkan oleh bintang merah yang lebih besar) yang disebut Panabungan (Pg), Sipoholon (Si), dan Hutabarat (Ht). Instrumen seismik (segitiga biru) dikerahkan meliputi wilayah Tarutung dan Sarulla.



Gambar 5. Model konseptual untuk graben Sarulla berdasarkan distribusi kegempaan. Fluida panas dari bawah patahan diangkut langsung ke permukaan di sepanjang patahan lemah.

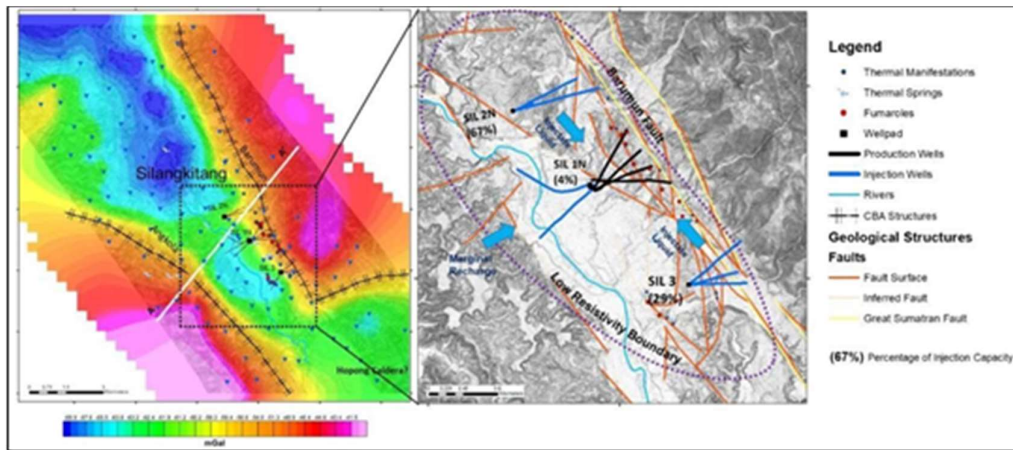
Penjelasan tektonik yang mungkin untuk model fluida tersebut adalah bahwa melepaskan *step-over* kanan di sepanjang sistem patahan kanan-lateral, seperti cekungan tarik Tarutung yang terpisah, terkait dengan kuadran ekstensional, dalam kasus di timur laut cekungan Tarutung. Ini persis wilayah di mana diamati *cluster* kecepatan tinggi, yang kita tafsirkan sebagai sedimen bantalan fluida dengan rekahan. Elemen dilatasi juga ditemukan oleh penyelidikan geologi struktural di wilayah ini didukung dengan terjadinya sumber air panas besar Panabungan, Hutabarat, dan Sipoholon terletak di timur laut cekungan Tarutung.

Lapangan panas bumi SIL yang dikembangkan di ujung utara Sarulla Graben dibatasi di sebelah timur oleh Sesar Barumon dan di sebelah barat oleh Sesar Angkola. Di daerah SIL inilah Sesar Barumon dan Sesar Angkola mulai menyimpang, menciptakan wilayah tegangan di ujungnya, membentuk Sarulla Graben. Oleh karena itu, Sarulla Graben mungkin bukan cekungan tarik terpisah yang khas yang dibentuk oleh interaksi slip dari dua segmen patahan yang tumpang tindih. Sesar Barumon adalah lemparan paling aktif dan terbesar, seperti yang ditunjukkan oleh tebing curam sesar yang mencolok dan geometri setengah graben dalam profil seismik.



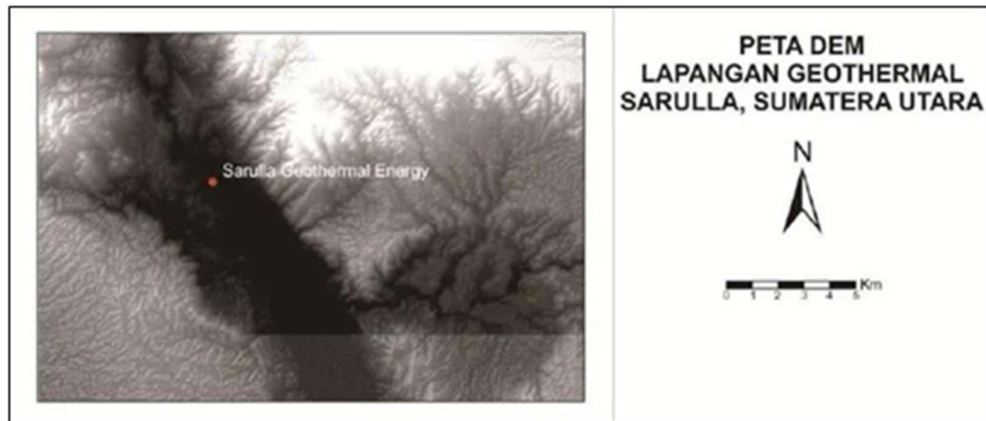
Gambar 6. Sarulla Graben dan Kaldera Hopong pada field geothermal NIL & SIL

Lapangan panas bumi SIL yang dikembangkan di ujung utara Sarulla Graben dibatasi di sebelah timur oleh Sesar Barumun dan di sebelah barat oleh Sesar Angkola. Di daerah SIL inilah Sesar Barumun dan Sesar Angkola mulai menyimpang, menciptakan wilayah tegangan di ujungnya, membentuk Sarulla Graben. Oleh karena itu, Sarulla Graben mungkin bukan cekungan tarik terpisah yang khas yang dibentuk oleh interaksi slip dari dua segmen patahan yang tumpang tindih. Sesar Barumun adalah lemparan paling aktif dan terbesar, seperti yang ditunjukkan oleh tebing curam sesar yang mencolok dan geometri setengah graben dalam profil seismik.



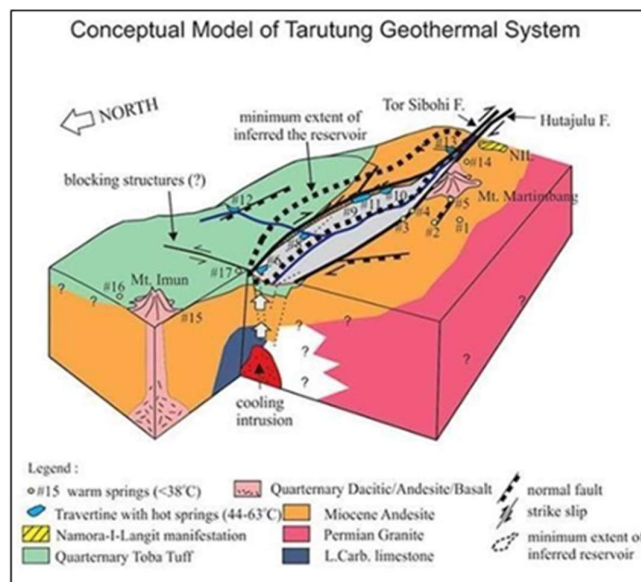
Gambar 7. Struktur Geologi Patahan pada lapangan Silangkitang (SIL)

Lapangan panas bumi SIL yang dikembangkan di ujung utara Sarulla Graben dibatasi di sebelah timur oleh Sesar Barumun dan di sebelah barat oleh Sesar Angkola. Di daerah SIL inilah Sesar Barumun dan Sesar Angkola mulai menyimpang, menciptakan wilayah tegangan di ujungnya, membentuk Sarulla Graben. Oleh karena itu, Sarulla Graben mungkin bukan cekungan tarik terpisah yang khas yang dibentuk oleh interaksi slip dari dua segmen patahan yang tumpang tindih. Sesar Barumun adalah lemparan paling aktif dan terbesar, seperti yang ditunjukkan oleh tebing curam sesar yang mencolok dan geometri setengah graben dalam profil seismik.



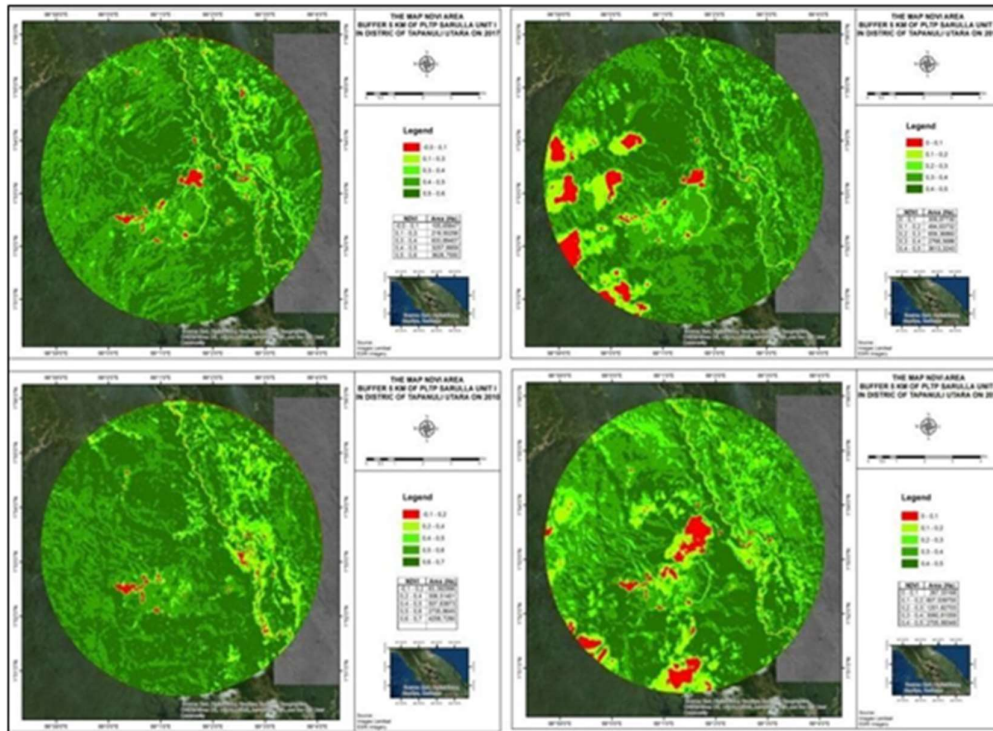
Gambar 8. Peta DEM Lapangan Geothermal Sarulla

Pada peta DEM geothermal Sarulla terdapat relief morfologi yang beragam di bagian timur yang menunjukkan relief yang relatif lebih halus dibandingkan segmen bagian barat. Hal tersebut dapat diinterpretasikan bahwa pada daerah ini disusun oleh batuan yang lebih muda seperti endapan vulkanik kuartar sementara pada segmen bagian barat menunjukkan relief yang lebih kasar dikarenakan pada peta geologi regional menunjukkan batuan berumur tersier bahkan terdapat besmen yang tersingkap mengindikasikan umur di bagian barat relatif lebih tua daripada bagian timur. Kedua segmen tersebut dibatasi oleh daerah yang berwarna gelap berarah Tenggara-Baratlaut negara tersebut adalah Sesar Besar Sumatera (Semangko) yang membentuk *pull apart basin* sebagai zona permeable keluarnya manifestasi area Sarulla.



Gambar 9. Model Konseptual Sistem Panas Bumi Sarulla

Pada hasil citra satelit *Normalisasi Different Vegetation Indeks* (NDVI) diperoleh dari band 4 dan band 5 dari citra Landsat 8 OLI dan kemudian dilakukan pengolahan data dengan memanfaatkan rumus NDVI lalu diperoleh informasi yang diekstraksi kedalam *imaging*. Hasil perhitungan NDVI dari tahun ke tahun memberikan gambaran NDVI. Perubahan lingkungan di sekitar sumber panas bumi di PLTP Sarulla mengikuti perubahan luas tutupan lahan dan suhu dengan menggunakan citra Landsat 8 OLI. Survei lapangan berada di titik referensi untuk pengolahan data, sedangkan data citra satelit Band adalah 1 sampai 11 sumber USGS, untuk menampilkan citra permukaan pada Landsat 8 OLI, true color dari RGB sampai 4.3, 2 dimana R = Band 4 (Red), G = Band 3 (Green) dan B = Band 2 (Blue). Pada Landsat 8 OLI Digital Number yaitu 16 bit, $2^{16} = 65.356$ harga minimum = 0 (Black) dan harga maksimum = 65.355 (White). Gambar ada di Landsat 8 OLI.



Gambar 10. Peta spasial NDVI dari Landsat 8 OLI untuk: 2010, 2016, 2017, dan 2018. Warna merah mewakili nilai NDVI dari 0 hingga 0,1 menunjukkan lebih sedikit vegetasi, warna hijau tua mewakili lebih banyak kehijauan NDVI.

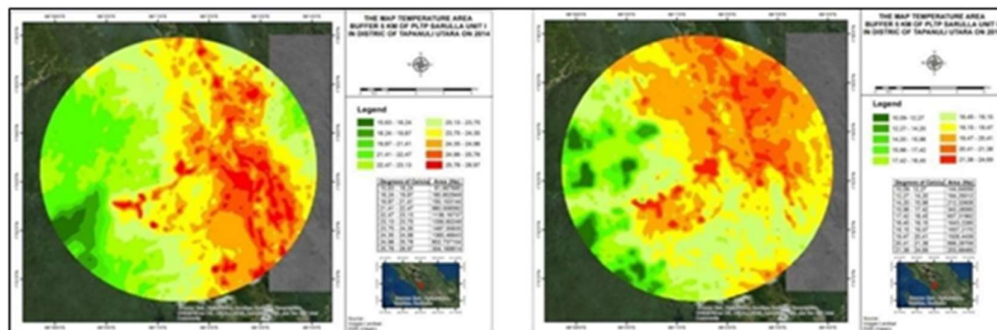
Gambar diatas menunjukkan bahwa nilai NDVI mengalami penurunan yang sangat drastis dan sangat jelas terlihat penurunan seperti pada nilai representasi vegetasi pada rentang 0,1 hingga 0,7. Klasifikasi NDVI dibagi menjadi tiga bagian, yaitu pada rentang <0,2 dikategorikan sebagai lahan terbuka, perairan, dan tidak bervegetasi sedangkan pada

rentang 0,2 – 0,5 dikategorikan sebagai vegetasi rendah dan pada kisaran $>0,5$ dikategorikan sebagai luas vegetasi tinggi. Hal ini dapat dilihat pada gambar perhitungan NDVI tahun 2010, 2016, 2017 dan 2018 di kawasan PLTP Sarulla bahwa setiap tahun kepadatan vegetasi mengalami penurunan yang cukup signifikan.

Tabel 1. Perubahan NDVI Geothermal Sarulla

	2010	2014	2016	2017	2018
<i>NDVI min</i>	0.5	0.3	0.1	-0.1	0.1
<i>NDVI max</i>	0.7	0.5	0.5	0.6	0.5
<i>Average</i>	0.6	0.4	0.3	0.25	0.3

Gambar diatas menunjukkan bahwa nilai NDVI mengalami penurunan yang sangat drastis dan sangat jelas terlihat penurunan seperti pada nilai representasi vegetasi pada rentang 0,1 hingga 0,7. Klasifikasi NDVI dibagi menjadi tiga bagian, yaitu pada rentang $<0,2$ dikategorikan sebagai lahan terbuka, perairan, dan tidak bervegetasi sedangkan pada rentang 0,2 – 0,5 dikategorikan sebagai vegetasi rendah dan pada kisaran $>0,5$ dikategorikan sebagai luas vegetasi tinggi. Hal ini dapat dilihat pada gambar perhitungan NDVI tahun 2010, 2016, 2017 dan 2018 di kawasan PLTP Sarulla bahwa setiap tahun kepadatan vegetasi mengalami penurunan yang cukup signifikan.



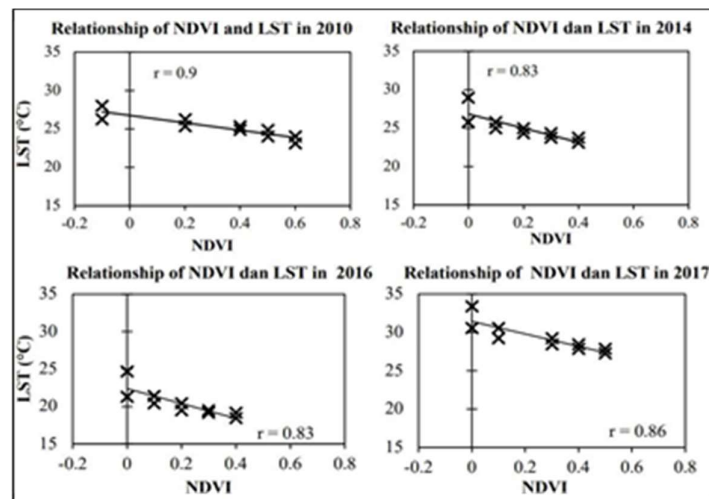
Gambar 11. Peta spasial LST dari Landsat 8 OLI tahun 2014 dan 2016. Warna merah mewakili suhu tinggi, hijau tua mewakili suhu rendah

Gambar diatas menunjukkan bahwa nilai LST mengalami penurunan yang sangat drastis dan sangat jelas terlihat peningkatan yang drastis, dari data suhu tahun 2010, 2014, 2016, 2017 dan 2018 yang telah diperoleh dapat dibuat – rata-rata kondisi perubahan suhu yang terjadi di area PLTP Sarulla Unit I.

	2010	2014	2016	2017	2018
TI min	23.11	24.35	19.47	29.27	17.06
TI max	28.01	28.97	24.69	33.44	20.91
Average	25.56	26.66	22.08	31.35	18.98

Tabel 2. Perubahan LST Geothermal Sarulla

Berdasarkan peta indeks suhu di PLTP Sarulla Unit I, suhu tertinggi ditunjukkan dengan warna merah dan suhu terendah ditunjukkan dengan warna hijau. Terlihat pada tahun 2017 bahwa daerah sekitar PLTP Sarulla Unit I memiliki suhu tertinggi mencapai 31.350 0C dibandingkan tahun-tahun lainnya dan suhu terendah pada tahun 2016 di 22.080 0C.



Gambar 12. Hubungan NDVI dengan LST pada Geothermal Sarulla

KESIMPULAN

Ketika penurunan NDVI sangat drastis dan suhu meningkat, dapat disimpulkan bahwa perubahan lingkungan terjadi di lokasi-lokasi tersebut dalam kategori lahan terdegradasi. Perubahan/kerusakan lahan dapat mengganggu manusia yang berada di sekitar. Geothermal Sarulla terletak di Provinsi Sumatera Utara, Kabupaten Tapanuli Utara dimana struktur geologi nya terbentuk di *pull apart basin* di area zona transtensi sesar turun. Hasil pengelompokan peta struktur diperoleh pola lineasi yang memiliki arah utara-selatan, tenggara-barat laut dan barat-timur. Struktur geologi geothermal Sarulla berupa zona transpresi, transtensi dan circular feature dari Kaldera Hopong yang merupakan efek dari aktifitas vulkanis. *Extensional dominated play type* merupakan tipe sistem geothermal yang

dimiliki oleh geothermal Sarulla dimana permeabilitas reservoir dikendalikan berdasarkan patahan dan rekahan dengan sumber panas dari aktifitas magmatisme pada cekungan Tarutung dengan *Caprock* alterasi lempungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abiduyo, Rizal., Daud, Yunus., Satya D.S. 2021. *Subsurface Structure Identification from Gravity Modelling of Silangkitang Geothermal Field for Future Injection Well Targeting*. PROCEEDINGS, The 2nd Digital Indonesia International Geothermal Convention (DIIGC) 2021
- Gunderson et al. 2000. *Geology and Thermal Features of the Sarulla Contract Area, North Sumatra, Indonesia*. Proceedings World Geothermal Congress Kyushu - Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000
- Nukman, Mochamad. 2019. *The Sipoholon Geothermal Field and adjacent geothermal systems along the North-Central Sumatra Fault Belt, Indonesia : Reviews on geochemistry, tectonics, and natural heat loss*. Program Studi Geofisika, Departemen Fisika, FMIPA, Gadjah Mada University, Sekip Utara, Yogyakarta 55281, Indonesia
- Muhsin. 2014. *A Fault-Controlled Geothermal System in Tarutung (North Sumatra, Indonesia) Investigated by Seismological Analysis*. Postdam University
- Pramudityo, Dedy. 2020. *Overview Lapangan Geothermal Sarulla dan Pemetaan Geomorfologi*. Institut Teknologi Bandung. Indonesia
- Tampubolon, Togi. 2019. *Identification of Geothermal Environments by Using Landsat Imagery at PLTP Sarulla unit I, Pahae Jae Subdistrict, North Tapanuli*. International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS) 2019. IOP Publishing