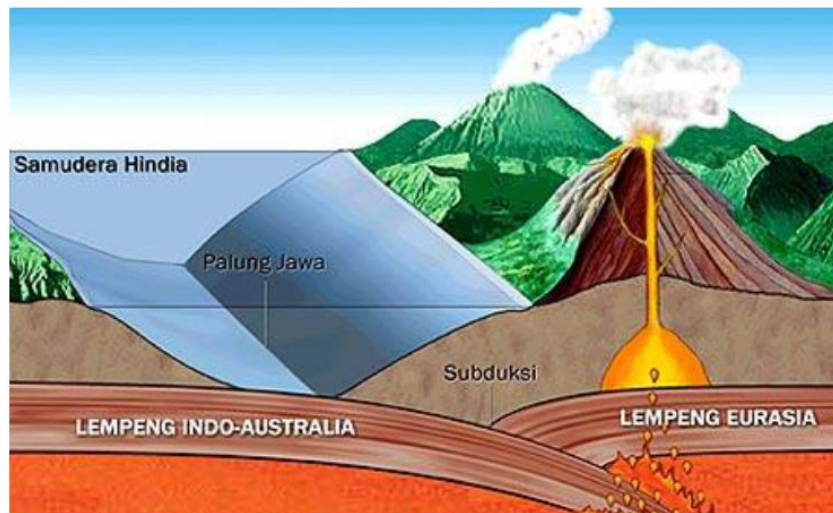


BAB II KAJIAN TEORI

2.1 Panas Bumi

Panas bumi adalah energi panas yang terbentuk secara alami dan tersimpan dalam wujud air panas atau uap panas terjadi pada kondisi geologi tertentu dengan kedalaman beberapa kilometer di kerak bumi. Sistem panas bumi dapat diartikan sebagai perpindahan panas alami dengan volume tertentu di bumi dimana panas dipindahkan dari sumber panas ke zona pelepasan panas [3]. Terbentuknya sumber energi panas bumi di Indonesia disebabkan oleh dua lempeng yang saling bertumbukan, yaitu Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia. Tumbukan antara kedua yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 dimana lempeng tektonik tersebut memberikan peranan yang penting untuk membentuk sumber energi panas bumi di Indonesia. Tumbukan lempeng India-Australia yang berada di selatan dan lempeng Eurasia yang berada di sebelah utara mengakibatkan zona penujaman (Subduksi) di bawah Pulau Jawa dan di kedalaman 10 km di bawah Pulau Sumatera. Dari proses magmatisasi yang terjadi di Pulau Sumatera umumnya lebih dangkal di bandingkan dengan Pulau Jawa. Hal ini disebabkan oleh perbedaan kedalaman pada jenis magma yang dihasilkan akan berbeda [8].

Pada kedalaman yang lebih dalam jenis magma akan memiliki sifat basa yang lebih cair serta mempunyai kandungan magmatik yang lebih tinggi. Sehingga mengakibatkan letusan gunung api yang lebih kuat dan menghasilkan endapan vulkanik lebih tebal dan terhampar luas. Untuk itu, reservoir panas bumi di pulau jawa umumnya lebih dalam dan akan menempati batuan vulkanik. Sedangkan di Pulau Sumatera reservoir panas bumi berada pada batuan sedimen dan ditemukan di kedalaman yang lebih dangkal [8].

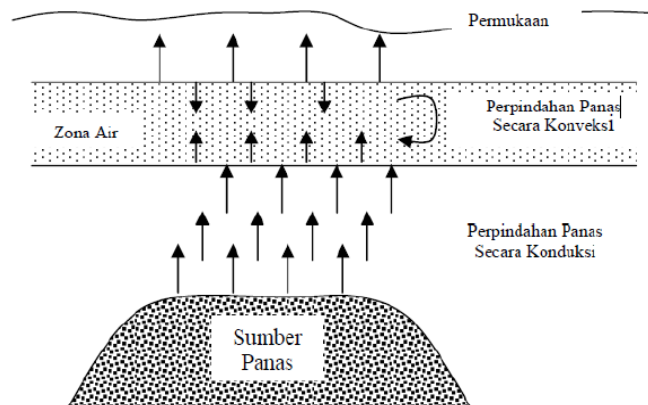


Gambar 2.1 Interaksi antara kedua Lempeng Tektonik : Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia [9].

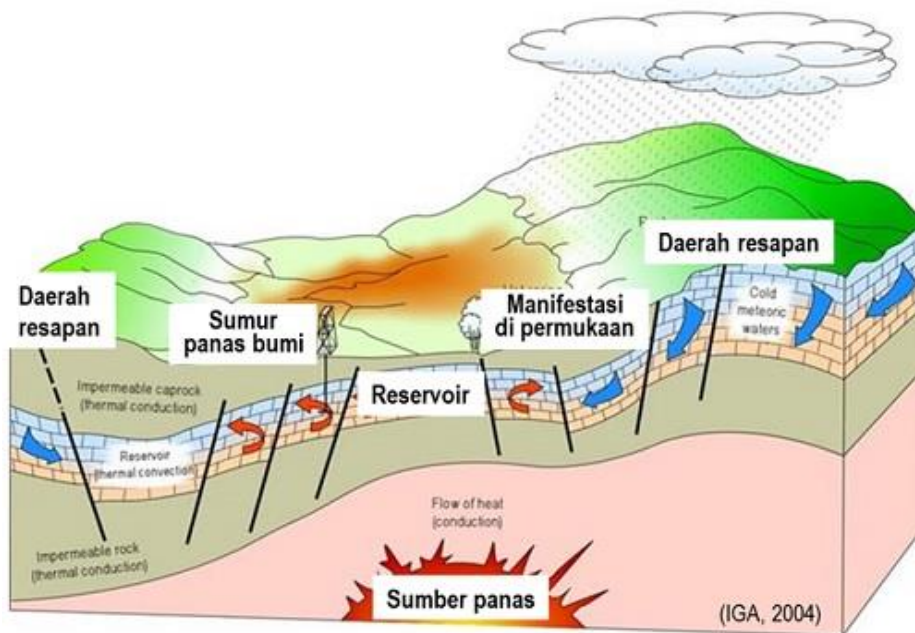
Sumber panas bumi terbentuk dari distribusi suhu dan energi panas yang berada di bawah permukaan bumi. Model konseptual panas bumi seperti rekahan dan patahan yang terdapat di permukaan mengakibatkan air dapat masuk ke dalam pori-pori batuan. Berikutnya air tersebut akan menembus ke bawah maupun ke samping selama masih ada celah untuk air dapat mengalir. Saat air sampai ke suatu sumber panas (*heat source*) menyebabkan temperatur air tersebut akan meningkat dan air akan menguap dan sebagian lagi akan tetap sebagai air dengan suhu yang tinggi. Fluida panas akan mentransfer panas ke batuan sekitar dengan proses konveksi, apabila temperatur meningkat mengakibatkan bertambahnya volume dan tekanan [8].

Fluida panas akan menekan batuan sekitarnya untuk mencari celah atau jalan keluar dan tekanan yang dilepaskan. Jika tekanan lebih tinggi dibandingkan tekanan di permukaan maka fluida bergerak naik pada celah-celah. Fluida tersebut akan keluar sebagai manifestasi permukaan. Untuk itu, terdapat beberapa manifestasi dari sistem panas bumi, seperti sumber air panas, *mud pools*, *geyser*, dan manifestasi panas bumi lainnya. Terbentuknya sistem panas bumi dari hasil perpindahan panas dari suatu sumber panas ke sekelilingnya yang terjadi secara konduksi dan konveksi

seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 Perpindahan panas secara konduksi terjadi melalui batuan, sedangkan perpindahan panas secara konveksi terjadi karena adanya kontak antara air dengan suatu sumber panas [8].



Gambar 2.2 Perpindahan panas di bawah permukaan [9].



Gambar 2.3 Ilustrasi sistem panas bumi yang terdiri dari sumber panas, reservoir, manifestasi di permukaan, sumur panas bumi, dan daerah resapan [10].

Perpindahan panas secara konveksi pada umumnya karena adanya pengaruh gaya apungan. Air karena pengaruh gaya gravitasi selalu memiliki kecenderungan untuk bergerak ke bawah. Jika air tersebut berinteraksi dengan suatu sumber panas maka akan menyebabkan perpindahan panas yang mengakibatkan temperatur air menjadi lebih tinggi sehingga air akan menjadi lebih ringan. Keadaan inilah yang akan membuat air yang lebih panas akan bergerak ke atas dan air yang dingin bergerak ke bawah, sehingga terjadilah sirkulasi air atau arus konveksi. Secara garis besar sistem panas bumi dikontrol oleh keberadaan sumber panas (*heat source*), batuan reservoir, lapisan penutup, keberadaan struktur geologi, dan daerah resapan air seperti pada Gambar 2.3 [9].

1. Sumber Panas (*heat source*)

Sumber panas dalam sistem panas bumi pada umumnya berasal dari magma. Magma terbentuk pada awalnya berasal dari hasil lelehan mantel (*partial melting*) akibat penurunan titik didih mantel karena terjadi infiltrasi H₂O pada zona subduksi. Magma dapat terbentuk karena pelelehan sebagian kerak bumi saat proses penebalan lempeng benua seperti yang terjadi pada tumbukan antar lempeng benua [11].

2. Fluida Panas Bumi

Asal fluida panas bumi dari air permukaan (air meteorik) yang masuk ke bawah permukaan melalui rekahan maupun ruang antar butiran batuan membuat terbentuknya sistem kantong fluida atau reservoir. Fluida juga dapat berasal dari batuan dalam bentuk air magmatik (air juvenil). Karakteristik fluida panas bumi dapat menyajikan informasi berkenaan tipe sistem panas bumi untuk itu perlu dilakukan analisis. Analisis ini berguna memperkirakan karakteristik fluida dalam reservoir dengan pendugaan temperatur reservoir (*geothermometer*), komposisi kimia fluida, asal-usul fluida, interaksi fluida terhadap batuan serta campuran fluida reservoir dengan fluida lain [12].

3. Reservoir

Reservoir merupakan lapisan yang tersusun dari batuan dengan sifat *permeable* dan porositas tinggi. Dengan keberadaan sifat batuan tersebut dapat berperan untuk menyimpan fluida berupa uap dan air panas yang berasal dari hasil pemanasan (konveksi dan konduktif) dalam suatu sistem hidrotermal. Lapisan reservoir umumnya berasal dari batuan klastik atau batuan vulkanik yang telah mengalami rekahan secara kuat [11].

4. Batuan Penudung (*caprock*)

Batuan penudung (*caprock*) berguna sebagai penutup reservoir. Lapisan ini berguna untuk mencegah keluar atau bocornya fluida panas bumi dari lapisan reservoir. Batuan penudung harus berupa lapisan batuan yang memiliki sifat kedap atau memiliki permeabilitas rendah. Batuan penudung umumnya tersusun dari lapisan batuan yang mempunyai mineral lempung sekunder yaitu hasil ubahan (*alteration*) akibat interaksi fluida dengan batuan yang dilewatinya. Mineral-mineral lempung sekunder yang membentuk lapisan penudung yaitu *montmorillonite*, *smectite*, *illite*, *kaolin*, dan *phyrophyllite*. Pada lingkungan tektonik aktif batuan penudung akan terdeformasi dan membentuk suatu rekahan. Akan tetapi adanya proses kimia berupa pengendapan mineral sangat membantu dalam menutup rekahan yang terbentuk (*self sealing*) contohnya pengendapan kalsit dan silika [11].

2.2 Sistem Panas Bumi Indonesia

Sistem panas bumi berdasarkan temperatur reservoirnya pada kedalaman sekitar 1 km dapat diklarifikasikan yaitu temperatur tinggi ($>225\text{ }^{\circ}\text{C}$), temperatur sedang ($125 - 225\text{ }^{\circ}\text{C}$), dan temperatur rendah ($<125\text{ }^{\circ}\text{C}$) [3]. Kondisi tersebut sangat potensial jika dilakukan pembuatan pembangkit listrik [13]. Selain itu, apabila dilihat dari asosiasi terhadap tatanan geologinya, sistem panas bumi di Indonesia dapat dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu sistem vulkanik, vulkano-tektunik, dan non-vulkanik. Sistem panas bumi vulkanik merupakan sistem panas bumi yang

berasosiasi dengan gunung api Kuartar yang umumnya berada pada busur vulkanik Kuartar yang memanjang dari Sumatera, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, sebagian Maluku, dan Sulawesi Utara. Pembentukan sistem panas bumi ini biasanya tersusun oleh batuan vulkanik menengah (andesit-basaltis) hingga asam dan umumnya memiliki karakteristik reservoir sekitar 1,5 km dan memiliki temperatur reservoir tinggi ($-250 \leq 370^{\circ}\text{C}$). Pada sistem panas bumi vulkano–tektonik yaitu sistem yang berasosiasi antara struktur graben dan kerucut vulkanik, umumnya terdapat di daerah Sumatera pada jalur sistem Sesar Sumatera (Sesar Semangko). Berikutnya untuk sistem panas bumi non-vulkanik yaitu sistem panas bumi yang tidak berhubungan langsung dengan vulkanisme dan umumnya berada di luar vulkanik Kuartar. Lingkungan non-vulkanik di Indonesia bagian barat umumnya tersebar di bagian timur *sunda land* (paparan sunda) karena kawasan tersebut didominasi oleh batuan yang menyusun kerak Benua Asia, seperti batuan metamorf dan sedimen. Potensi panas bumi di daerah penelitian tersebar pada lingkungan geologi panas bumi non-vulkanik. Sistem panas bumi di daratan Sulawesi bagian tenggara lebih dipengaruhi oleh gabungan antara pengaruh pola struktur geologi area pensesaran (*heat sweep*) dan sisa panas dari aktivitas magmatik di kedalaman. Di kawasan timur Indonesia, lingkungan non-vulkanik berada di lengan dan kaki Sulawesi dan Kepulauan Maluku hingga Irian didominasi oleh batuan sedimen granit, metamorf, dan sedimen laut [13]. Klasifikasi kelompok sistem panas bumi di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Klasifikasi kelompok sistem panas bumi di Indonesia [14].

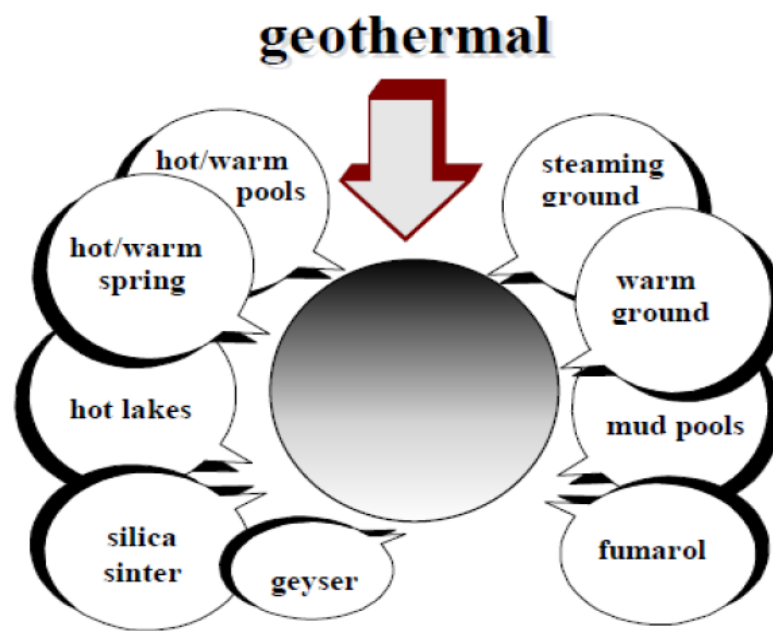
Kriteria	Wilayah		
	Sumatera	Jawa, Nusa tenggara, Sulawesi Utara	Sebagian besar Sulawesi, Maluku dan Papua
Manifestasi	Fumarol suhu	Fumarol suhu	Fumarol dan

permukaan	tinggi dengan steam jet, mata air mendidih, solfatara, lumpur panas, kolam lumpur, danau asam, alterasi luas dan sangat intensif	tinggi, mata air mendidih, solfatara, kolam lumpur, alterasi intensif	solfatara
Material penyusun	Riolitik-andesitik, produk gunung api muda, ketebalan material sekitar 1 km	Andesitik-basaltik, produk gunung api muda dan sedang, ketebalan material . 2,5 km	Produk gunung api tua, sedimen
Struktur	Sesar regional sumatera dan sesar-sesar sekunder, ketidakselarasan, kaldera	Sesar <i>local</i> , kaldera, ketidakselarasan	Sesar <i>local</i> Graben ketidakselarasan

2.3 Manifestasi Panas Bumi

Adanya suatu sumber daya panas bumi di bawah permukaan ditunjukkan oleh keberadaan manifestasi panas bumi di permukaan (*geothermal surface manifestation*). Manifestasi tersebut berupa mata air panas, kubangan lumpur panas, geyser dan manifestasi panas bumi lainnya. Pemandian air panas, kolam air panas yang biasanya digunakan masyarakat sekitar untuk mandi, mandi, memasak, memasak, dan lain sebagainya. Manifestasi panas bumi di permukaan diduga terjadi

karena penyebaran panas dari permukaan atau karena rekahan yang memungkinkan fluida panas bumi (uap dan udara panas) mengalir ke permukaan [15]. Sumber daya panas bumi bawah permukaan ditunjukkan dengan adanya manifestasi panas bumi di permukaan seperti sumber air panas, kolam lumpur, geyser, dan manifestasi lainnya.



Gambar 2.4 Jenis-jenis manifestasi permukaan [16].

Pada Gambar 2.4 diatas merupakan jenis-jenis manifestasi panas bumi di permukaan. Jenis manifestasi panas bumi permukaan ini biasanya merupakan daerah pertama yang dicari dan disurvei selama tahap eksplorasi [16].

1. Tanah Hangat (*Warm Ground*)

Adanya sumber daya panas bumi di bawah permukaan ditunjukkan dengan adanya tanah yang memiliki suhu lebih tinggi dari suhu sekitarnya. Hal ini disebabkan oleh perubahan konduksi atmosfer dari batuan bawah permukaan. Berdasarkan besarnya gradien suhu tersebut maka dapat diklasifikasikan, yaitu daerah tidak panas (*non-*

thermal area) terjadi di sekitar gradien suhu di daerah sekitar 10-40°C/km. Sedangkan pada area panas (*thermal area*) dibedakan menjadi dua yaitu area semi *thermal* merupakan area yang mempunyai gradien temperatur sekitar 70-80°C/km dan area *hypothermal* yang memiliki gradien temperatur sangat tinggi [11].

2. Permukaan Tanah Beruap (*Steaming Ground*)

Di beberapa daerah terdapat tempat dimana uap panas bumi nampak keluar dari permukaan. Jenis manifestasi panas bumi tersebut disebut *steaming ground*. Diduga uap panas tersebut berasal dari suatu lapisan tipis dekat permukaan yang mengandung air panas yang mempunyai temperatur sama atau lebih besar dari titik didihnya [11].

Steaming ground sangat berbahaya bagi makhluk hidup hal ini dikarenakan temperatur di daerah tersebut umumnya cukup tinggi. Umumnya lebih besar dari 30°C/km. Di daerah di mana terdapat permukaan tanah beruap umumnya tumbuhan-tumbuhan tidak tumbuh karena temperatur yang terlampau tinggi [11].

3. Mata Air Panas (*Hot or Warm Spring*)

Mata air panas merupakan salah satu petunjuk adanya sumber daya panas bumi di bawah permukaan. Mata air panas atau hangat terbentuk karena adanya aliran panas atau hangat di bawah permukaan melalui rekahan-rekahan batuan. Mata air hangat memiliki temperatur lebih kecil dari 50°C dan untuk air panas mempunyai temperatur lebih besar dari 50°C. Sifat air di permukaan sering digunakan untuk memperkirakan reservoir di bawah permukaan. Mata air panas yang bersifat asam biasanya merupakan manifestasi permukaan suatu sistem panas bumi yang dominan uap, kemudian mata air panas yang bersifat netral biasanya dominan air dan umumnya jenuh dengan silika [11].

4. Kolam Air Panas (*Hot Pools*)

Kolam air panas terbentuk adanya aliran air panas di bawah permukaan melalui rekahan batuan. Air panas ini dapat berasal dari suatu reservoir air panas terdapat jauh di bawah permukaan atau bisa saja berasal dari air tanah yang menjadi panas karena pemanasan oleh uap panas. Salah satu contoh kolam air panas yang terdapat di lapangan Orakei Korako, New Zealand [11].

5. Telaga Air Panas (*Hot Lake*)

Telaga air panas pada dasarnya sama dengan kolam air panas, akan tetapi lebih tepat bila dikatakan telaga air panas karena luas daerah permukaan lebih luas biasanya lebih dari 100 m^2 . Telaga air panas terjadi di daerah di mana terdapat reservoir dominasi air maupun dominasi uap [11].

6. Fumarol

Fumarol merupakan lubang kecil yang memancarkan uap panas kering (*dry steam*) atau uap panas yang mengandung butiran-butiran air (*wet steam*). Hampir semua fumarol yang merupakan manifestasi permukaan dari sistem dominasi air memancarkan uap panas basah. Temperatur uap tersebut umumnya tidak lebih dari 100°C . Fumarol jenis ini sering disebut *soffioni* [11].

7. Geyser

Geyser merupakan mata air panas yang menyembur ke udara secara *intermittent* atau pada selang waktu tak tentu dengan ketinggian air yang sangat beragam yaitu kurang dari satu meter hingga ratusan meter. Lamanya air menyembur ke permukaan juga sangat beragam beberapa detik hingga beberapa jam. Geyser merupakan manifestasi panas bumi dari sistem dominasi air [11].

8. Kubangan Lumpur Panas (*Mud Pools*)

Kubangan lumpur panas merupakan manifestasi panas bumi di permukaan. Kubangan lumpur umumnya mengandung gas tidak terkondensasi (CO_2) dengan sedikit uap panas. Lumpur hadir dalam keadaan cair akibat pengembunan uap panas sedangkan letupan-letupan yang terjadi akibat pancaran gas CO_2 [11].

2.4 Tahanan Jenis Panas Bumi

Tahanan jenis merupakan salah satu parameter geofisika yang berguna dalam penyelidikan sistem panas bumi. Perbedaan nilai tahanan jenis pada tiap bagian sistem panas bumi dapat digambarkan sebagai suatu struktur tahanan jenis bawah permukaan yang membantu dalam pembuatan model konseptual sistem panas bumi. Komponen sistem panas bumi umumnya mempunyai tatanan geologi yang khas, aktivitas hidrotermal yang terjadi dapat mempengaruhi nilai tahanan jenis batuan di daerah panas bumi [17]. Struktur tahanan jenis sistem panas bumi bergantung pada parameter fisik berupa temperatur, porositas batuan, salinitas fluida hidrotermal, saturasi fluida dalam pori batuan dan nilai konduktivitas antarmuka batuan [18].

Bagian paling atas dari suatu lapisan permukaan umumnya terdiri dari batuan yang tidak mengalami alterasi. Batuan ini memiliki nilai tahanan jenis yang tinggi dari batuan penudung. Batuan non-alterasi dengan nilai tahanan jenis tinggi diatas batuan penudung memiliki saturasi fluida yang sangat minim bertindak sebagai jalur konduktif [19]. Sementara tingginya nilai tahanan jenis ini disebabkan oleh ketidakhadiran mineral lempung yang mampu menyediakan jalur konduktivitas antarmuka batuan [18]. Dibawah zona resistif terdapat batuan penudung dengan ciri nilai resistivitas rendah (1-10 Ohm.m). Hal ini disebabkan kehadiran mineral lempung yang memiliki nilai *Cation Exchange Capacity* (CEC) yang tinggi. CEC merupakan kapasitas batuan untuk menyediakan jalur konduktif melalui bidang batas antarmuka batuan [18][19]. Pada bagian reservoir memiliki nilai tahanan jenis yang lebih tinggi dibanding batuan penudung, hal ini dikontrol oleh penurunan

jumlah *smektit* dan digantikan oleh *mixed clay*, *ilit*, *klorit* dan *epidot* [19]. Mineral-mineral tersebut memiliki nilai CEC yang jauh lebih rendah dibandingkan *smektit* sehingga memiliki konduktivitas elektrik yang lebih rendah (lebih resistif). Kemudian pada nilai tahanan jenis yang lebih tinggi lagi yakni $>100 \text{ ohm.m}$ umumnya merupakan batuan vulkanik [17].

2.5 Metode Magnetotellurik

Metode magnetotellurik (MT) merupakan salah satu metode yang diaplikasikan dalam eksplorasi geofisika dengan memanfaatkan medan EM alami bumi. Medan EM ini dibangkitkan oleh berbagai proses fisik yang cukup kompleks dengan spektrum frekuensi yang sangat luas ($10^{-5} \text{ Hz} - 10^4 \text{ Hz}$) [20]. Pada frekuensi yang cukup rendah (kurang dari 1 Hz) berasal dari angin matahari yang mengandung partikel bermuatan listrik yang berinteraksi dengan medan magnet permanen bumi yang menyebabkan variasi medan EM. Pada frekuensi tinggi (lebih dari 1 Hz) disebabkan oleh aktivitas meteorologi berupa petir. Petir yang terjadi di suatu tempat membuat gelombang EM terperangkap antara ionosfer dan bumi dan menyebar ke seluruh bumi [20][21].

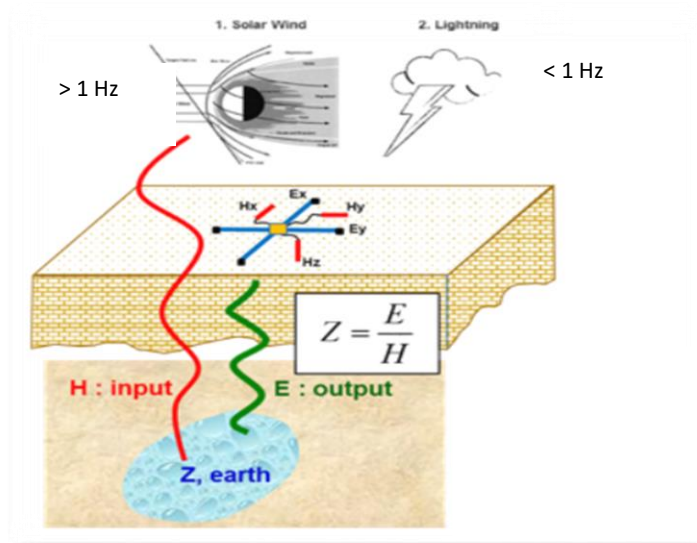
Pada dasarnya, medan elektromagnetik akan merambat secara vertikal ke bumi, karena besarnya kontras tahanan jenis di lapisan udara bumi. Hal tersebut mengakibatkan pembelokan atau refraksi vertikal kedua medan (listrik dan magnet) yang ditransmisikan ke bumi. Medan elektromagnetik dikaitkan dengan arus telurik yang ada di bumi. Kemudian medan magnet akan menimbulkan induksi batuan, batuan konduktif pada lapisan bumi akan menghasilkan medan magnet sekunder. Perubahan medan magnet horizontal akan menyebabkan perubahan medan listrik horizontal, hasil interaksi inilah yang akan diukur di permukaan oleh penerima. [11].

Sinyal yang ditangkap pada alat magnetotelurik merupakan sinyal yang berasal dari medan elektromagnetik total berasal dari gelombang primer dan sekunder yang terjadi di permukaan bumi, yang bergantung pada variasi waktu. Sifat gelombang elektromagnetik dalam medium penetrasi gelombang akan bergantung pada frekuensi gelombang dan tahanan jenis medium yang dilaluinya [11].

2.6 Sumber Medan Magnetotellurik

Ada berbagai macam sumber gelombang EM berupa aktivitas manusia, industri dan peristiwa alam itu sendiri yang disebabkan oleh aktivitas matahari. Di permukaan matahari (korona) selalu terjadi ledakan plasma, sebagian besar partikel yang dilepaskan adalah partikel hidrogen. Proses ionisasi di permukaan matahari ini akan menyebabkan hidrogen berubah menjadi plasma yang mengandung proton dan elektron. Plasma yang kecepatannya relatif rendah bersifat acak dan berubah seiring waktu yang dikenal sebagai angin matahari [7].

Ketika angin matahari memasuki medan magnet bumi, muatan positif dan negatif akan terpisah dalam plasma ke arah yang berlawanan, menyebabkan adanya arus listrik dan medan EM. Medan magnet tersebut berlawanan dengan medan magnet bumi yang menyebabkan medan magnet di tempat tersebut berkurang sehingga membentuk batas medan magnet bumi di atmosfer yang disebut dengan lapisan *magnetopause* yang merupakan batas terluar atmosfer bumi [7].



Gambar 2.5 Sumber magnetotellurik [22].

Medan EM yang dibawa oleh angin matahari akan terus menjalar sampai ke lapisan ionosfer dan kemudian terjadi interaksi dengan lapisan ionosfer. Interaksi ini menyebabkan gelombang EM mengalir di lapisan ionosfer. Gelombang EM ini kemudian akan menyebar ke permukaan bumi dengan sifat yang berfluktuasi seiring waktu. Jika medan EM menembus permukaan bumi maka akan dihitung menggunakan material bumi yang dapat berperan sebagai konduktor. Akibatnya, arus induksi akan muncul. Arus induksi ini akan diinduksi ke permukaan bumi menyebabkan timbulnya arus eddy yang dikenal dengan arus tellurik. Arus tellurik ini akan menjadi sumber medan listrik di permukaan bumi yang akan digunakan dalam metode MT [23].

2.7 Sumber Noise

Noise (gangguan) adalah bagian dari data kelistrikan dan magnetik baik yang dibuat oleh manusia maupun yang dihasilkan alam dan tidak memenuhi asumsi gelombang datar yang disyaratkan oleh metode magnetotellurik. *Noise* buatan manusia yaitu pagar besi, saluran jaringan komunikasi, pergerakan kendaraan dan kereta api serta sumber buatan manusia lainnya yang dapat mencemari respons data

magnetotellurik. *Noise* dari pergerakan generator, jaringan pipa, kendaraan dan kereta api dapat diketahui dengan menempatkan perangkat pada jarak minimal 5 km dari sumber kebisingan. *Noise* dari alam yaitu petir, angin, dan badai hujan juga dapat menurunkan kualitas data, namun *noise* tersebut dapat dihindari dengan tidak melakukan akuisisi pada saat musim hujan. Mengubur koil dan menjaga kabel dipol secara elektrik di atas tanah juga membantu mengurangi *noise* angin. Pengukuran medan magnet sulit dilakukan dalam kondisi berangin karena dapat menyebabkan gerakan tanah yang tidak signifikan. Hal ini juga menyebabkan kumparan induksi bergerak dan mengubah komponen medan magnet bumi searah dengan kumparan magnet [23].

2.8 Prinsip Dasar Metode Magnetotellurik

Gelombang elektromagnetik yang datang akan merambat di atmosfer menuju bumi, sebagian gelombang akan masuk ke bumi secara difusi dan sebagian gelombang lainnya akan kembali terpantulkan (refleksi).

Gelombang elektromagnetik yang ditransmisikan ke bumi dapat diukur dalam suatu media yang memiliki nilai tahanan jenis tertentu. Hasil interaksi tersebut menghasilkan induksi yang menyebabkan terbentuknya arus telurik dan medan magnet sekunder. Sinyal yang ditangkap oleh alat magnetotellurik adalah sinyal yang berasal dari medan elektromagnetik total, yaitu medan elektromagnetik yang berasal dari gelombang primer dan sekunder yang terjadi di permukaan bumi, dengan variasi waktu. Sesuai dengan sifat gelombang elektromagnetik dalam suatu media, penetrasi gelombang akan bergantung pada frekuensi gelombang dan tahanan jenis media yang dilaluinya [7].

2.9 Persamaan Maxwell

Pada persamaan Maxwell menunjukkan suatu fenomena listrik dan magnet dapat digambarkan menggunakan persamaan yang melibatkan medan listrik dan magnet.

Medan listrik adalah area atau ruang di sekitarnya yang bermuatan listrik. Besarnya medan listrik pada suatu titik sebagian besar merupakan gaya Coulomb yang didasarkan pada satuan muatan positif pada titik tersebut. Arah medan listrik pada suatu titik sama dengan arah mengikuti gaya Coulomb pada titik tersebut. Sedangkan medan magnet dapat dihasilkan dari bahan magnet alami dan dapat juga berupa arus listrik. Sehingga medan magnet dapat diartikan sebagai ruang di sekitar penghantar yang mengangkut arus [7][8].

Persamaan umum yang dapat mendeskripsikan sifat gelombang EM yang digunakan persamaan Maxwell yaitu terdiri atas:

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Hukum Faraday}) \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Hukum Ampere}) \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{Hukum Coulomb tentang Medan Listrik}) \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Hukum Coulomb tentang Medan Magnet}) \quad (2.4)$$

dimana $\vec{E}$: medan listrik (Volt/m)

$\vec{B}$: fluks atau induksi magnetik (Weber/m² atau Tesla)

$\vec{H}$: medan magnet (Ampere/m)

$\vec{J}$: rapat arus (Ampere/m²)

$\vec{D}$: perpindahan listrik (Coulomb/m²)

$\frac{\rho}{\epsilon_0}$: rapat muatan listrik (Coulomb/m³)

Persamaan (2.1) diturunkan dari hukum Faraday yang menyatakan bahwa perubahan medan magnet terhadap waktu menginduksi adanya medan listrik. Begitu pula yang terjadi pada hukum Ampere (2.2) menyatakan bahwa medan

magnet tidak hanya terjadi karena adanya sumber yang berupa arus listrik. Tetapi bisa juga disebabkan oleh medan listrik yang berubah seiring waktu sehingga menimbulkan medan magnet. Hukum Coulomb (2.3) menyatakan bahwa medan listrik disebabkan oleh adanya muatan listrik sebagai sumbernya [20]. Hukum Coulomb tentang medan magnet (2.4) menyatakan bahwa tidak ada medan magnet monopol. Besarnya nilai medan magnet dan induksi medan listrik bergantung pada sifat dari medium itu sendiri [20].

Hubungan antara intensitas medan dengan fluks yang terjadi pada medium dinyatakan oleh persamaan berikut,

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \frac{\vec{E}}{\rho} \quad (2.7)$$

Dimana μ : permeabilitas magnetik (Henry/m)

ϵ : permitivitas listrik (Farad/m)

σ : konduktivitas (Ohm-1/m atau Siemens/m)

ρ : tahanan-jenis (Ohm.m)

Untuk menyederhanakan masalah, sifat fisik medium diasumsikan tidak berubah-ubah dengan waktu dan posisi homogen isotropik. Jadi muatan yang terakumulasi seperti yang dinyatakan dalam persamaan (2.7) tidak terjadi dan persamaan Maxwell dapat dituliskan kembali sebagai berikut,

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.10)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.11)$$

Tampak bahwa dalam persamaan Maxwell yang dinyatakan oleh persamaan di atas hanya terdapat dua variabel yaitu medan listrik $\vec{E}$ dan medan magnet $\vec{H}$. Dengan operasi curl terhadap persamaan (2.8) dan (2.9) serta menggabungkan besaran-besaran yang telah diketahui pada persamaan (2.10) akan kita peroleh pemisahan variabel $\vec{E}$ dan $\vec{H}$ sehingga,

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = -\mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

Dengan memperhatikan identitas vektor $\nabla \times \nabla \times \vec{x} = (\nabla \cdot \nabla \cdot \vec{x}) - \nabla^2 \vec{x}$ dimana $\vec{x}$ adalah $\vec{E}$ atau $\vec{H}$, serta persamaan $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ yang dinyatakan oleh persamaan (2.10) berlaku pada medium homogen, maka kita dapatkan persamaan gelombang (persamaan Helmholtz) untuk medan listrik dan medan magnet sebagai berikut,

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.14)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

Jika variasi terhadap waktu dapat direpresentasikan oleh fungsi periodik sinusoidal maka,

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0(\vec{r}) e^{i\omega t} \quad (2.16)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}_0(\vec{r}) e^{i\omega t} \quad (2.17)$$

dimana $\vec{E}_0$ dan $\vec{H}_0$ masing-masing adalah amplitudo medan listrik dan medan magnet, dan ω adalah frekuensi gelombang EM [20].

Merujuk penejelasan di atas, maka persamaan (2.14) dan (2.15) dapat di ubah menjadi

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = i\omega \mu_0 \sigma \vec{E} \quad (2.18)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = i\omega \mu_0 \sigma \vec{H} \quad (2.19)$$

Solusi elementer pada persamaan (3.19) adalah

$$\vec{E} = \vec{A}e^{-kz} + \vec{B}e^{+kz}; k = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma} \quad (2.20)$$

Dimana $\vec{A}$ dan $\vec{B}$ merupakan suatu konstanta yang ditentukan dari kondisi batas dari k adalah konstanta gelombang [7][20].

Pada kondisi yang umum dijumpai dalam eksplorasi geofisika (frekuensi lebih rendah dari 10 Hz, medium bumi) suku yang mengandung ε (perpindahan listrik) dapat diabaikan terhadap suku yang mengandung σ (konduksi listrik) karena harga $\omega\mu\sigma \gg \omega^2\mu\varepsilon$ untuk $\mu = \mu\mu_0 = 4\pi \cdot \frac{10^{-7}H}{m}$. Pendekatan tersebut adalah aproksimasi keadaan kuasi-stasioner dimana waktu tempuh gelombang diabaikan [24].

2.10 Kedalaman Penetrasi (*Skin Depth*)

Sama seperti persamaan difusi yang menggambarkan konduktansi panas, medan gelombang elektromagnetik pada persamaan ini juga mengenal konsep kedalaman penetrasi, salah satu sifat medan elektromagnetik yang memiliki hubungan antara medan elektromagnetik dan lapisan konduktif, sehingga energi dari medan elektromagnetik akan dilemahkan. Sehingga jarak tempuh atau tempuh dari medan elektromagnetik juga akan semakin berkurang. Berapapun besar nilai konduktivitas lapisan konduktif saat melintasi lapisan tersebut. Maksimum yang dapat dicapai

oleh medan elektromagnetik saat menembus lapisan konduktif ini. [8]. *Skin Depth* menyatakan seberapa dalam gelombang EM dapat terpenetrasi ke dalam bumi. *Skin depth* didefinisikan sebagai kedalaman dalam medium homogen dimana amplitudo gelombang EM telah dikurangi menjadi $1/e$ dari amplitudo di permukaan bumi ($\ln e = 1$ atau $e = 2.718 \dots$). Dalam hal ini amplitudo medan listrik dan medan magnet sebanding dengan kedalaman penetrasi δ sehingga [8] :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ meter} \quad (2.21)$$

Dimana f adalah frekuensi medan (Hz) dan ρ adalah tahanan jenis medium homogen atau ekuivalensinya $\omega = 2\pi f$, μ merupakan permeabilitas ruang hampa dengan $\mu_0 = \mu = 4\pi \times 10^{-7}$. Pada persamaan (2.21) dimana frekuensi berbanding terbalik dengan *skin depth* jadi semakin besar periode atau waktu perekaman data maka semakin dalam penetrasi data yang terekam [8].

2.11 Impedansi, Tahanan Jenis Semu, dan Fasa

Impedansi (Z) merupakan *tensor* yang menghubungkan medan listrik dengan medan magnet.

$$\vec{E} = \vec{Z} \vec{H} \quad (2.22)$$

Komponen – komponen yang ada pada persamaan di atas adalah

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

Diketahui kuat medan magnet $\mathbf{H}$ yang bervariasi terhadap waktu dapat ditulis dengan $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{-i\omega t}$ sehingga persamaan 2.1 dapat ditulis ulang dengan menjadi persamaan :

$$\mathbf{H} = \frac{1}{i\omega\mu_0}(\nabla \times \mathbf{E}) \quad (2.24)$$

Di dalam bumi, perbandingan kuat medan listrik dan medan magnet dengan menyubstitusikan ($\mathbf{E}_x = E_0 e^{-kz} e^{-i\omega t}$) dapat ditulis sebagai :

$$\mathbf{H}_y = \frac{1}{i\omega\mu_0} E_0 e^{-kz} e^{-i\omega t} \quad (2.25)$$

Dimana medan listrik $\mathbf{E}_x$ tegak lurus dengan medan magnetik $\mathbf{H}_y$. Informasi mengenai struktur tahanan jenis bumi dari pengukuran di permukaan ($z = 0$), maka perbandingan medan listrik $\mathbf{E}$ tegak lurus medan magnet $\mathbf{H}$ yang terukur digunakan dan didefinisikan sebagai impedansi:

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{H}} \quad (2.26)$$

Dengan melakukan substitusi komponen persamaan ($\mathbf{E}_x = E_0 e^{-kz} e^{-i\omega t}$), impedansi $\mathbf{Z}$ dapat ditulis sebagai :

$$\mathbf{Z}_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{(1-i)}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega\mu_0\rho} \quad (2.27)$$

Tahanan jenis semu (ρ_{xy}) merepresentasikan volume rata-rata tahanan jenis bumi dengan jarak yang sama ke kedalaman penetrasi, tahanan jenis semu (ρ_{xy}) dapat diselesaikan dari persamaan 2.27 :

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{\omega\mu_0}} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (2.28)$$

Kemudian untuk fasa (φ_{xy}) merefleksikan perbedaan fasa antara komponen medan listrik dengan medan magnet yang dituliskan dengan :

$$\varphi_{xy} = \arg(\mathbf{Z}_{xy}) \quad (2.29)$$

[25].

2.12 Pemodelan Data Magnetotellurik

Model 1-D adalah model berlapis horizontal, yaitu model yang terdiri dari beberapa lapisan, dimana tahanan jenis masing-masing lapisan. Dalam hal ini parameter model 1 D adalah tahanan jenis dan ketebalan setiap lapisan. Secara umum, hubungan data parameter model dinyatakan oleh :

$$\mathbf{d} = \mathbf{F}(\mathbf{m}) \quad (2.30)$$

dimana $\mathbf{d}$ adalah vektor data, $\mathbf{m}$ adalah vektor model dan $\mathbf{F}(\mathbf{m})$ adalah fungsi *forward modeling*. Pemecahan masalah menggunakan algoritma dilakukan Newton dengan mencari solusi model yang meminimumkan fungsi objektif [20].

Untuk dapat menggambarkan kondisi bawah permukaan secara lebih realistis maka digunakan model 2-D dimana tahanan jenis bervariasi terhadap kedalaman (z) dan jarak dalam arah penampang atau profil (y) sehingga $r(y,z)$. Dalam hal ini tahanan jenis medium tidak bervariasi pada struktur arah sumbu- x yang merupakan arah struktur (*strike*). Untuk pemodelan 2-D berupa model bawah permukaan yang terdiri dari balok-balok dengan ukuran berbeda. Dalam hal ini parameter 2-D adalah nilai tahanan jenis dari tiap blok yang mempunyai dimensi lateral (x) dan vertikal (z). Perbandingan antara medan magnet dan medan listrik dinamakan dengan impedansi. Impedansi ini yang mengandung informasi mengenai nilai tahanan jenis medium terhadap kedalaman [20].

2.13 Pemodelan *Forward* 2D

Ciri dasar medan magnetotellurik dalam medium heterogen dua dimensi adalah sifat pembagian menjadi dua bagian independen yang disebut *mode*. Pemodelan *Forward* dalam metode elektromagnetik untuk menentukan distribusi tahanan jenis tertentu membutuhkan solusi numerik dari persamaan Maxwell [26]. Persamaan Maxwell untuk *TE mode* diberikan di bawah ini,

$$\frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial z} = -\sigma E_x \quad (2.31)$$

dimana ω - frekuensi melingkar osilasi medan, μ_0 - permeabilitas ruang kosong. Dalam hal ini medium di lingkungan titik seharusnya homogen dengan konduktifitas listrik σ . Solusi persamaan ini memberikan distribusi E_x di area pemodelan. Dua komponen medan magnet dapat ditemukan dengan menggunakan E_x [26].

$$H_y = -\frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (2.32)$$

$$H_z = \frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial y} \quad (2.33)$$

Tahanan jenis sebenarnya dan fasa untuk E_x dan H_y dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\rho_{xy} = \frac{1}{i\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (2.34)$$

$$\phi_{xy} = \arg\left(\frac{E_y}{H_y}\right) \quad (2.35)$$

Dalam kasus polarisasi magnet, persamaan TM Maxwell memiliki bentuk sebagai berikut [26].

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) = i\omega\mu H_x \quad (2.36)$$

Solusi persamaan ini memberikan distribusi E_x di area pemodelan. Dua komponen medan listrik dapat ditemukan menggunakan H_x :

$$E_y = \frac{1}{\sigma} \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (2.37)$$

$$E_z = -\frac{1}{\sigma} \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (2.38)$$

Pemodelan *forward* dalam metode elektromagnetik untuk menentukan distribusi tahanan jenis tertentu membutuhkan solusi numerik dari persamaan Maxwell. Saat ini, ada 3 pendekatan utama, dengan *finite differences* (FD), *finite elements* (FE), dan metode persamaan integral. Pendekatan ini berbeda dalam diskritasi ruang model dan cara mendapatkan solusi. Metode *Finite-element* sebagai fungsi matematika digunakan untuk menyelesaikan masalah pemodelan *forward* memberikan hasil terbaik dibandingkan dengan metode *mesh*. Untuk medium

pemodelan medan elektromagnetik dibagi menjadi *triangle cells grid* dengan tahanan jenis yang berbeda. Perilaku di lapangan di dalam *cells grid* di dekati dengan fungsi basis linier [26].

$$N(x, z) = \frac{(a+bx+cz)}{2A} \quad (2.39)$$

Pemodelan *forward* adalah bagian penting dari algoritma inversi. Sangat berguna di semua tahap 1D, 2D, dan 3D untuk mengevaluasi kelebihan dan kelemahan inversi dan interpretasi berbagai macam hipotesis untuk data dan model [26].

2.14 Pemodelan Inversi

2.14.1 Pemodelan Inversi 1D Bostick

Pemodelan 1D data magnetotellurik menggunakan inversi *Bostick*. Inversi *Bostick* ini merupakan estimasi yang digunakan untuk memperoleh kurva tahanan jenis semu $\rho_a(T)$ dan juga sebagai pertimbangan pola distribusi tahanan jenis terhadap kedalaman, dimana informasi fasa tidak ada (tidak dipercaya). Inversi *Bostick* memberikan perkiraan distribusi tahanan jenis dan kedalaman $\rho_B(h)$ hingga $\rho_N(h)$, dimana h adalah penetrasi kedalaman pada medium *halfspace* dalam tahanan jenis yang sama untuk tahanan jenis semu pada periode (T),

$$h = \frac{\sqrt{\rho_a(T)}}{2\pi\mu} \quad (2.40)$$

Tahanan jenis Bostick $\rho_B(h)$ terhadap kedalaman, diberikan oleh:

$$\rho_B(h) = \rho_a(T) \frac{1+m(T)}{1-m(T)} \quad (2.41)$$

dimana $m(T)$ adalah gradien pada kurva tahanan jenis semu dalam skala log – log:

$$m = \frac{d \log \rho_a(T)}{d \log(T)} = \frac{T}{\rho_a(T)} \frac{d \rho_a(T)}{d(T)} \quad (2.42)$$

Pernyataan alternatif untuk tahanan jenis *Bostick* pada kedalaman (h) digunakan oleh beberapa penulis :

$$\rho_B(h) = \rho_a(T) \left(\frac{\pi}{2\phi(T)} - 1 \right) \quad (2.43)$$

Informasi fasa $\phi(T)$ berhubungan dengan aslinya [27].

2.14.2 Pemodelan Inversi 2D *Nonlinear Conjugate Gradient (NLCG)*

Pada model 2D, terdapat variasi nilai tahanan jenis pada arah lateral dan vertikal yang terdiri blok – blok tertentu. Medium yang ada didiskritisasi menjadi blok dengan geometri tetap sehingga parameter model adalah nilai tahanan jenis untuk tiap blok. Ukuran blok dibuat tidak seragam untuk menggambarkan resolusi data MT yang berkurang terhadap jarak dan kedalaman dari titik pengamatan, serta untuk penerapan syarat batas pada penyelesaian persamaan diferensial medan EM (*TE mode* atau *TM mode*) secara numerik menggunakan *finite difference* [28]. Penyelesaian numerik persamaan *TE mode* dan *TM mode* sangatlah kompleks. Menyelesaikan masalah pemodelan inversi 2D MT menggunakan algoritma *non-linear conjugate gradient* (NLCG) dilakukan dengan mencari solusi model yang meminimalkan fungsi objektif. ψ . Secara umum, fungsi yang menghubungkan data dengan parameter model adalah fungsi non-linear, oleh karena itu pemodelan inversi data MT menggunakan model 2D dengan persamaan dan algoritma penyelesaian inversi non-linear 2D [28]. Bentuk umum masalah inversi non-linear dituliskan dalam persamaan :

$$\mathbf{d} = \mathbf{F}(\mathbf{m}) + \mathbf{e} \quad (2.44)$$

dimana $\mathbf{d} = [d^1, d^2, \dots, d^N]^T$ adalah vektor data dengan tiap d^i yang merupakan salah satu logaritma amplitudo atau fasa dari ρ_{app} untuk keterangan model TE atau TM, $\mathbf{m} = [m^1, m^2, \dots, m]^T$ adalah vektor model dari parameter yang didefinisikan sebagai fungsi resistivitas ($m(x) = \log \rho(x)$) , $\mathbf{e}$ adalah *vector error*, dan $\mathbf{F}$ adalah fungsi pemodelan ke depan.

Fungsi objektif didefinisikan sebagai :

$$\psi = (\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m}))^T \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m})) + \lambda \|\mathbf{L} (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)\|^2 \quad (2.45)$$

Dimana λ merupakan parameter regulasi sebuah bilangan positif. $\mathbf{V}$ adalah matriks kovarian *error*, dan $\mathbf{L}$ adalah operator linear (*smoothness*) atau operator Laplacian yang dituliskan sebagai berikut :

$$\|\mathbf{L} (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)\|^2 = \int (\Delta (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0))^2 dx \quad (2.46)$$

Metode NLCG memberikan langsung pemecahan untuk meminimumkan fungsi objektif, dengan model *sequence* yang dituliskan :

$$\psi (\mathbf{m} + \mathbf{m}_j + \alpha_j \mathbf{h}_j) = \min_{\alpha} \psi (\mathbf{m}_j + \alpha_j \mathbf{h}_j) \quad (2.47)$$

Dimana :

α_j = ukuran langkah-langkah

$\mathbf{h}_j$ = arah pencarian

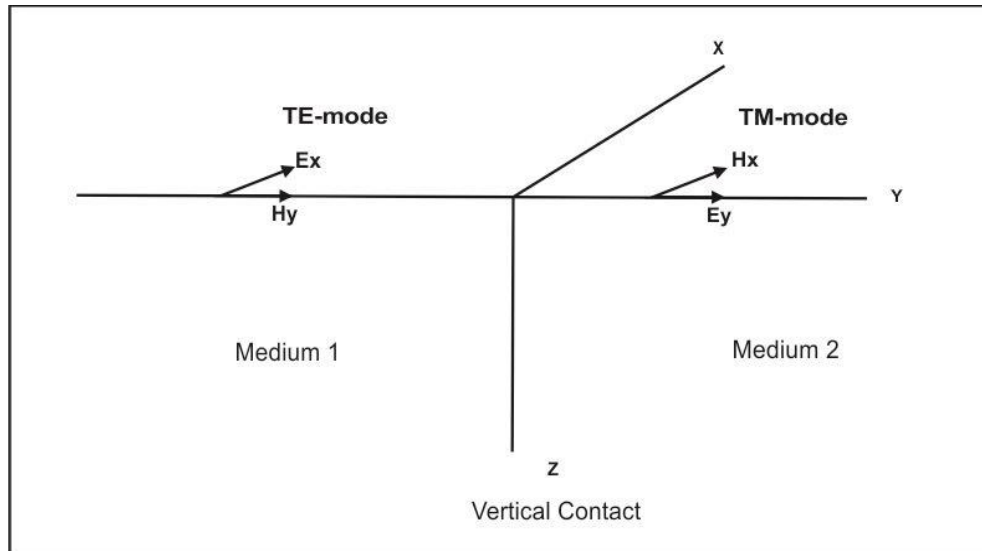
$\mathbf{C}_j$ = suatu *precondition*

$\mathbf{g}_j$ = gradient dari fungsi objektif

$\mathbf{B}_j$ = suatu nilai skalar yang di hitung dengan :

$$\mathbf{B}_j = \frac{\mathbf{g}_0^T \mathbf{C}_j (\mathbf{g}_j - \mathbf{g}_{j-1})}{\mathbf{g}_{j-1}^T \mathbf{C}_{j-1} \mathbf{g}_{j-1}} \quad (2.48)$$

2.15 Mode Pengukuran Magnetotellurik



Gambar 2.6 Prinsip *mode* pengukuran magnetotellurik [29].

Dalam metode pengukuran magnetotellurik, terdapat dua *mode* pengukuran. Hal inilah yang menjadi dasar pengukuran metode magnetotellurik. Dimana penempatan sensor magnet dan sensor listrik menghasilkan 2 mode pengukuran yaitu *Transverse Electric (TE) mode* dan *Transverse Magnetic (TM) mode* [30].

1. *TE (Transverse Electric) Mode*

Pada *mode* ini komponen medan listrik sejajar dengan arah struktur utama (arah x) dan komponen medan magnet tegak lurus dengan arah struktur utama (arah sumbu y dan z) [29]. Pada *TE mode*, arus listrik tidak akan mengalir melintasi batas antar daerah yang memiliki nilai tahanan jenis berbeda. Komponen E_x kontinu pada sumbu y. Arus listrik akan menginduksi bagian yang lebih konduktif dan bukan bagian yang lebih tahan. Ini karena efek kerusakan konduktif pada arus. Respons tahanan jenis semu di bagian konduktif hilang pada frekuensi rendah. Hal tersebut dapat terjadi karena induksi dan akan lebih sensitif terhadap perubahan medan magnet [30].

2. *TM (Transverse Magnetic) Mode*

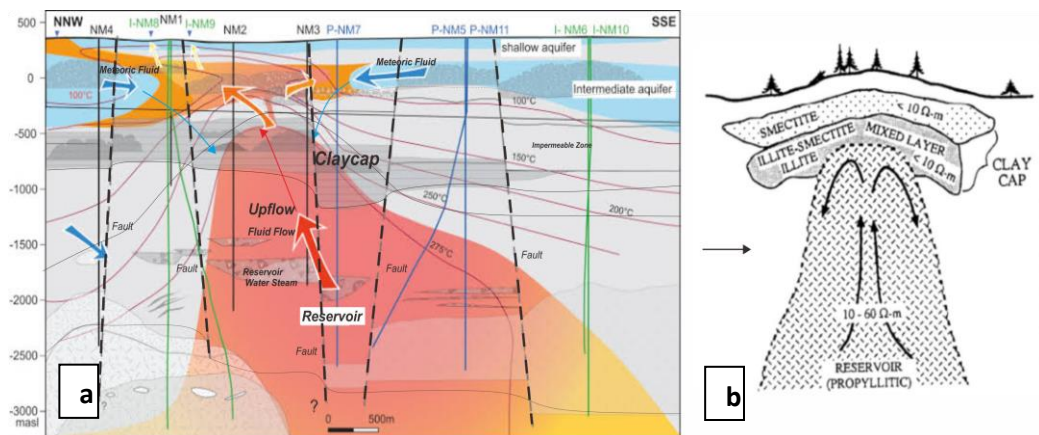
Dalam *mode* ini, komponen medan magnet akan sejajar dengan arah struktur utama (arah x) dan komponen medan listrik akan tegak lurus dengan arah struktur utama (arah sumbu y dan z). Arus listrik *TM mode* akan melintasi batas antar bagian yang memiliki tahanan jenis berbeda. Dalam *TM mode* Anda akan menemukan efek statis yang disebabkan oleh heterogenitas permukaan akibat beban yang terakumulasi di batas medium. Efek statis ini juga dapat menyebabkan tahanan jenis dan nilai frekuensi rendah tetap terlihat [30].

2.16 Koreksi Efek *Static Shift*

Data MT dapat terdistorsi karena heterogenitas lokal di dekat permukaan dan faktor topografi yang dikenal sebagai efek *static shift* (efek pergeseran statif). Akumulasi muatan listrik pada konduktivitas batas media menciptakan medan listrik sekunder yang tidak ada pada frekuensi tersebut [31]. Hal ini menyebabkan kurva *sounding* MT (log tahanan jenis semu ke periode log) bergeser ke atas atau ke bawah sehingga sejajar dengan kurva bunyi yang seharusnya. Dalam skala log, pergeseran vertikal kurva dinyatakan sebagai resistivitas resistansi pada suatu konstanta [32]. Interpretasi atau pemodelan data MT yang terdistorsi akan menghasilkan model parameter yang salah. Jika pada medium 1D, pemodelan kurva *sounding* tahanan jenis semu dikalikan dengan konstanta k akan menghasilkan lapisan dengan jenis resistansi dan ketebalan yang masing-masing dikalikan dengan masing-masing k dan $k\frac{1}{2}$. Oleh karena itu, penentuan konstanta k tersebut sangat penting untuk mengoreksi kurva *sounding* MT sebelum dilakukan pemodelan [32]. Kemudian, data MT tidak terlalu stabil di lapisan dangkal karena perbedaan topografi yang juga dikenal sebagai efek galvanik (distorsi galvanik). Efek galvanik perlu dihilangkan, terutama untuk data yang tidak dilengkapi data *TDEM*. Untuk mengatasi masalah tersebut, pendekatan inversi 1D digunakan sebagai solusi sesi *TDEM* untuk mengurangi efek galvanik [33].

2.17 Konseptual Model Geologi Panas Bumi

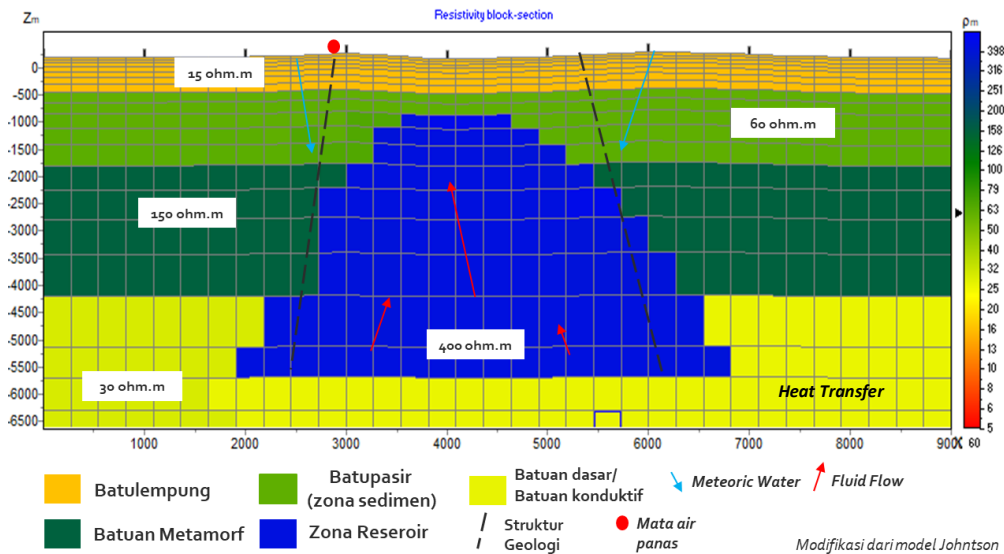
Pada Gambar 3.4 menunjukkan model panas bumi yang dijadikan rujukan dalam menentukan model sintetik yang akan dibuat. Gambar 3.4 a merupakan model panas bumi Ngatamariki Selandia Baru yang telah dikembangkan untuk pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan model disesuaikan mengikuti skema umum sistem panas bumi oleh Johnston seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 b. Model konseptual ini akan menjadi acuan dalam menjelaskan pendugaan reservoir yang dibuat dalam model sintetik menggunakan pengukuran metode magnetotellurik pemodelan 2D.



Gambar 2.7 Model konseptual panas bumi (a) Model panas bumi lapangan Ngatamariki [34] (b) Skema umum sistem panas bumi oleh Johnston [35].

2.18 Model Sintetik

Model sintetik dibuat dalam penelitian ini untuk memperkirakan seberapa efektif metode magnetotellurik digunakan dalam kasus pendugaan reservoir panas bumi berdasarkan kontras nilai tahanan jenis. Model sintetik dibuat berdasarkan model konseptual geologi panas bumi lapangan X, Sulawesi Tenggara pada Gambar 5.1 didapat berupa penampang model sintetik yang dibuat dalam *software ZondMT2D*.

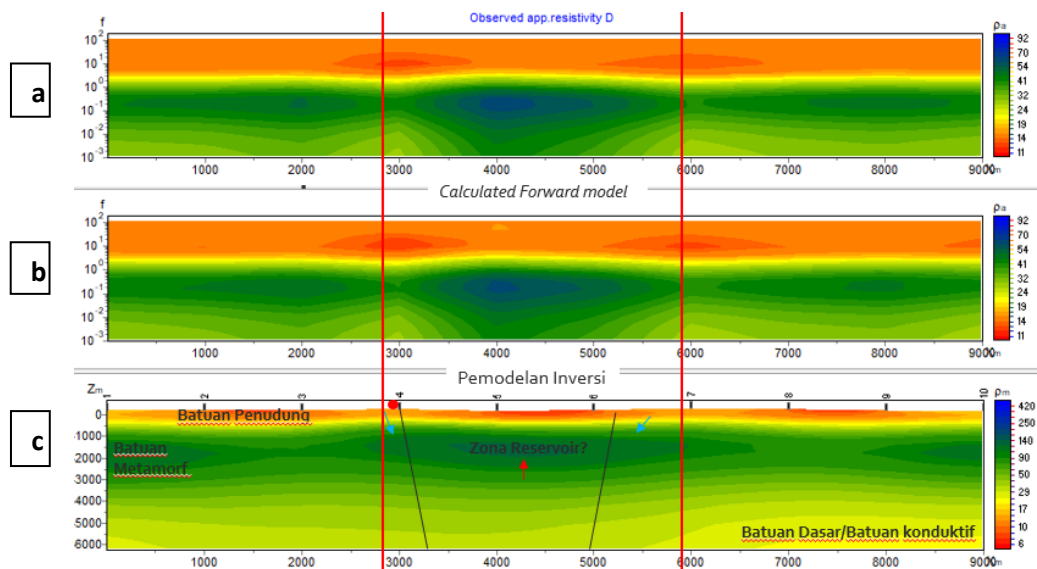


Gambar 2.8 Penampang model sintetik

Daerah prospek panas bumi lapangan X melingkupi daerah tersebar pada lingkungan geologi panas bumi non-vulkanik. Sistem panas bumi di daratan Sulawesi bagian tenggara lebih dipengaruhi oleh gabungan antara pengaruh pola struktur geologi area pensesaran (*heat sweep*). Dan sisa panas dari aktivitas magmatik di kedalaman [36][37]. Litologi daerah penelitian dilihat dari stratigrafinya tersusun dari batuan permukaan, batuan sedimen, dan batuan metamorf serta batuan dasar pada model tentatif berupa batuan konduktif terdapat sumber panas sisa magma.

Pemunculan manifestasi air panas pada permukaan menandakan keberadaan sistem panas bumi. Kelurusan manifestasi di permukaan sesuai dengan sesar-sesar yang berkembang, diduga sebagai jalur bagi fluida dari reservoir naik dan muncul ke permukaan dalam bentuk manifestasi air panas [37]. Dari model konseptual geologi tersebut ditentukan respons bawah permukaan dengan ditampilkan sintetik model lalu dilakukan *forward modelling* dan *inverse modelling*. Parameter model yang digunakan dalam data sintetik yaitu berjumlah 10 titik MT, dan rentang periode 0.01 – 10000 s. Ilustrasi sintetik diatas didasarkan pada model konseptual geologi

yang telah dibuat. Dengan demikian, model sintetik tersebut akan merepresentasikan keadaan bawah permukaan berdasarkan nilai tahanan jenis.



Gambar 2.9 Pemodelan dari data sintetik (a) Observasi *forward modelling* (b) Kalkulasi *forward modelling* (c) *Inverse modelling*

Berdasarkan respons yang didapat pada model sintetik yang telah dibuat dilakukan *forward modelling* 2D dengan metode *finite element*. Hal ini bisa terlihat dari hasil *calculated app. resistivity Invariant mode (D+)* yang menunjukkan kontras anomali. Inversi dilakukan dengan iterasi 30 kali dengan *misfit error* mendekati 1.0 % dengan *invariant mode* dengan target kedalaman ≥ 6000 meter. Berdasarkan hasil inversi dan kalkulasi *forward modelling* yang telah dilakukan terdapat anomali panas bumi yang Batuan penudung ditunjukkan dengan nilai tahanan jenis yang rendah, nilai tahanan jenis rendah ini ditandai dengan kehadiran mineral lempung. Nilai tahanan jenis rendah di daerah penelitian pada memiliki nilai tahanan jenis yang lebih tinggi dibandingkan di daerah vulkanik. Batuan penudung ini tersusun dari batuan sedimen (zona sedimen). Reservoir pada daerah penelitian dicirikan dengan nilai tahanan jenis tinggi. Lapisan reservoir yang menyimpan fluida panas. Memiliki temperatur dan tekanan dari sistem panas bumi pada batuan meta-sedimen yang kaya akan rekahan akibat pensesaran dan bersifat *permeable*. Dengan

demikian, model sintetik yang telah dibuat dapat menggambarkan profil bawah permukaan berdasarkan nilai tahanan jenis pada daerah panas bumi non-vulkanik.