

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Geologi Arjuno Welirang

2.1.1 Geomorfologi

Pembagian satuan morfologi di kompleks Gunung Arjuno-Welirang dapat dibedakan menjadi tujuh satuan geomorfologi, yaitu satuan tubuh Gunung Anjasmoro, tubuh tua kompleks Arjuno-Welirang, erupsi samping Gunung Bulak dan Pundak, tubuh muda Gunung Arjuno-Welirang, Puncak Gunung Arjuno-Welirang, Kaki Gunung Arjuno Welirang, Kaki Gunung Penanggungan. Beberapa satuan batuan dan sesar yang ada pada kompleks gunung Arjuno-Welirang ditunjukkan pada peta geologi Arjuno-Welirang **Gambar 2.1**.

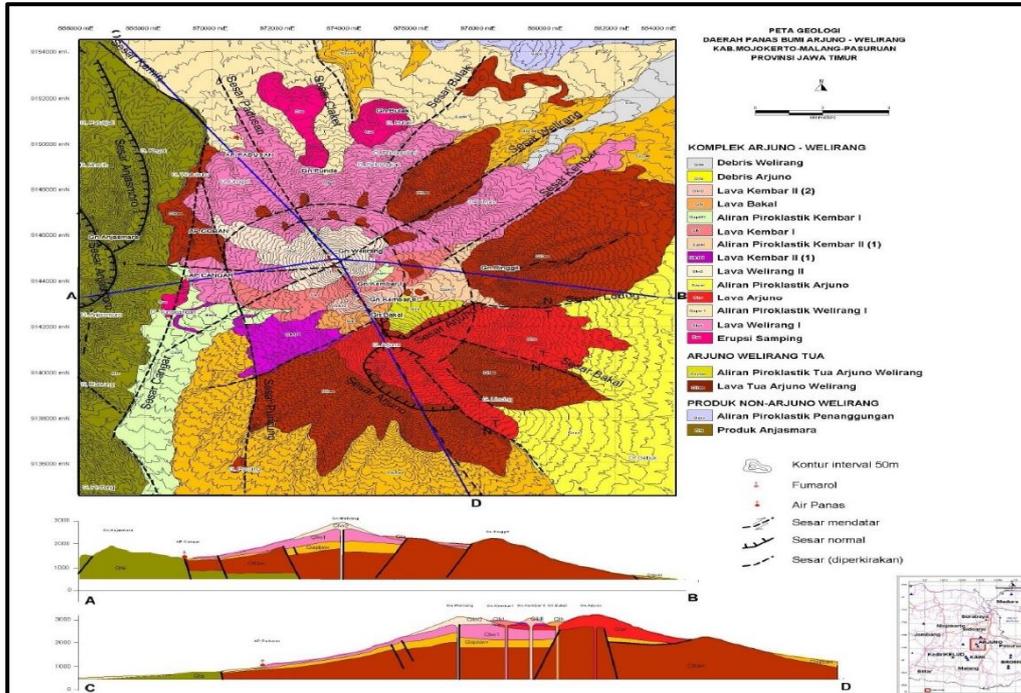
2.1.2 Stratigrafi

Secara garis besar Komplek Gunungapi Arjuno-Welirang terbagi menjadi batuan alas, produk erupsi Arjuno Welirang Tua dan produk erupsi Arjuno-Welirang Muda. Berdasarkan data regional dan tatanan tektonik Jawa Timur, daerah penyelidikan berada pada Zona Kendeng dengan batuan dasar berupa batuan beku dan sedimen (Tim Survei Geologi dan Geokimia PSDG, 2010).

Berdasarkan data di atas posisi daerah penyelidikan yang berada di bagian selatan zona Kendeng diperkirakan tersusun oleh batuan yang sama berupa batuan beku dan sedimen, walaupun pada pemetaan di lapangan tidak ditemukan batuan sedimen yang muncul di permukaan, hal tersebut diperkirakan karena tutupan dari produk vulkanik Arjuno Welirang yang cukup tebal dan luas (Kelompok Penyelidikan Panasbumi PSDG, 2010).

Pemetaan geologi panas bumi dengan metoda vulkanostratigrafi dapat mendelineasi perpindahan sumber panas (*heat source*) yang sangat terkait dengan pola struktur geologi di area prospek panas bumi tersebut. Kenampakan di lapangan ditunjukkan dengan munculnya pusat - pusat erupsi yang membentuk pola kelurusan berarah barat laut tenggara. Setidaknya terdapat 5 (lima) pusat erupsi yaitu Gunung Welirang, Gunung Arjuno, Gunung Kembar I, Gunung Kembar II, Gunung Bakal dan erupsi samping

pada Gunung Bulak, Gunung Pundak di utara dan Gunung Tunggangan di bagian barat. Masing - masing produk gunungapi tersebut diklasifikasikan sebagai letusan magmatik yang menghasilkan produk berupa lava dan piroklastik. Gambaran batuan vulkanik G. Ariuno- Welirang diawali oleh sejarah erupsi G.Arjuno-Welirang Tua. Deformasi tektonik yang sangat kuat mempengaruhi aktivitas vulkanik G.Arjuno-Welirang, sehingga posisi kawah utama G.Arjuno-Welirang Tua sulit ditentukan. Berdasarkan analisis citra dan kenampakan morfologi di lapangan pembentukan batuan erupsi samping terbentuk sebelum terbentuknya Gunung Welirang, dicirikan oleh pola aliran lava yang cenderung menabrak Gunung Pundak dan Gunung Bakal sehingga mengalir ke sampingnya. Setelah pembentukan erupsi samping kemudian terjadi erupsi besar yang mengeluarkan material vulkanik Arjuno-Welirang tua sehingga membentuk kekosongan pada produk Arjuno Welirang Tua, hal tersebut terlihat dengan nampaknya bentukan *ring fracture* berupa zona amblesan/ *collapse*. Kekosongan tersebut kemudian memfasilitasi munculnya produk vulkanik baru berupa produk Welirang dan Arjuno Muda, yang juga dipengaruhi oleh sesar mendatar di permukaan (Sesar Dekstral Padusan) yang berarah baratlaut tenggara sebagai antitetik dari Sesar Sinistral Welirang yang berarah baratdaya-timurlaut. Setelah terbentuknya Gunung Arjuno dan Welirang muda proses vulkanik berlanjut dengan pembentukan Gunung Kembar I, diikuti Gunung Kembar II dan Gunung Bakal yang berarah ke tenggara. Pembentukan erupsi terakhir yang menghasilkan produk magmatik adalah Gunung Kembar II yang berada di tengah antara Gunung Welirang dan Gunung Arjuno. Catatan erupsi terakhir yang diperoleh dari data Direktorat Vulkanologi menyatakan bahwa pada tahun 1950 di puncak Gunung Welirang terjadi erupsi lumpur dan juga abu dalam volume yang tidak besar, dan tidak terbentuk adanya bentukan lava baru. Hal tersebut diperkirakan mencerminkan dari proses letusan freatik - freatomagmatik yang mencerminkan terbentuknya sistem hidrotermal di kawasan tersebut (Kelompok Penyelidikan Panasbumi PSDG, 2010).



Gambar 2.1 Peta Geologi Arjuno-Welirang (Kelompok Penyelidikan Panasbumi PSDG, 2010)

2.1.3 Struktur Geologi

Menurut Kelompok Penyelidikan Panasbumi PSDG (2010), struktur geologi yang berkembang dikelompokkan sesuai arah sesar, yaitu arah utara selatan, barat laut tenggara, baratdaya-timurlaut, dan barat - timur. Selain itu terbentuk beberapa struktur vulkanik seperti ring *fracture* dan zona amblasan. Struktur geologi yang berkembang yaitu :

- Sesar berarah utara selatan, beberapa sesar pada arah ini diwakili oleh sesar Cangar, sesar Puncung dan sesar Claket, berupa kelurusan manifestasi, munculnya gawir sesar dan air terjun serta perbedaan ketinggian pada topografi yang cukup terjal.
- Sesar berarah barat laut – tenggara, sesar ini diperkirakan sebagai pola struktur yang muncul berupa antitetik dari sesar utama dengan arah baratdaya - timurlaut sejajar pola Meratus. Sesar ini diwakili oleh sesar Padusan, sesar Kemiri, dan sesar Bakal. Sesar Kemiri dan sesar Claket diperkirakan membentuk suatu daerah graben yang bagian turunnya diisi oleh aliran piroklastik Welirang. Kenampakan dilapangan dicirikan oleh kelurusan air panas dan topografi yang terjal. Sesar ini kemungkinan mengontrol munculnya air panas di sekitar Padusan dan berpengaruh dalam pembentukan daerah impermeabel dalam sistem panas bumi Arjuno - Welirang.
- Sesar berarah baratdaya – timurlaut, sesar ini diperkirakan sebagai sesar utama yang mempengaruhi munculnya kompleks gunungapi Arjuno- Welirang. Sejajar dengan arah sesar basement yang berpola Meratus. Memiliki kecenderungan berasosiasi terhadap munculnya Gunung Penanggungan yang menerus ke arah lumpur Sidoarjo. Sesar ini diwakili oleh Sesar Welirang, sesar Kembar dan sesar Bulak. Kenampakan di lapangan berupa gawir yang membentuk air terjun.
- Sesar berarah Barat – Timur, Sesar ini diwakili oleh sesar Ledug dan sesar Ringit. Penarikan sesar didasarkan pada kelurusan topografi dan citra *landsat*.
- Rim Kaldera Anjasmoro, Sesar ini berjenis sesar normal yang membentuk gawir curam dan melingkar. Kenampakan

di lapangan dapat dilihat jelas dari arah jalan menuju Cangar. Diperkirakan merupakan bentukan dari sisa kaldera tua yang terbentuk akibat aktivitas vulkano tektonik di kompleks Anjasmoro.

- Sektor *collapse* atau Amblasan, sesar yang terbentuk berupa sesar normal ditunjukkan dengan bentukan yang khas setengah melingkar dengan arah bukaan ke tenggara dan timurlaut. Sesar-sesar ini ditunjukkan oleh sesar Arjuno. Disamping itu sektor amblasan ditarik berdasarkan kelurusan dari tubuh tua Gunung Arjuno-Welirang dengan daerah bukaan ke arah baratdaya. Amblasnya daerah ini kemungkinan diakibatkan oleh aktivitas vulkanik Gunung Arjuno-Welirang yang memuntahkan material vulkaniknya sehingga terjadi kekosongan dan memicu munculnya produk vulkanik baru seperti Gunung Arjuno-Welirang muda, Gunung Kembar I,II dan Gunung Bakal.

2.2 Manifestasi Panasbumi Arjuno Welirang

Sebaran manifestasi panas bumi di kompleks Arjuno Welirang terdapat di lima lokasi berupa tiga kelompok air panas (Padusan, Coban, dan Cangar), fumarol dan alterasi di puncak Welirang, serta alterasi di sekitar Gunung Pundak.

2.2.1 Air Panas Padusan

Air panas berada di sekitar Kali Kretek yang juga digunakan sebagai tempat pariwisata air panas Padusan. Air panas muncul pada batuan aliran piroklastik dan bongkah-bongkah lava andesit produk G.Welirang, terdapat oksida besi, air jernih, tidak berwarna, tidak berasa. Contoh air panas Padusan 1 pada koordinat UTM (671.172 mT,9.149.741 mS) elevasi 893 m dpl, temperatur 55°C pH 6,3. Sedangkan contoh air panas Padusan 2 pada koordinat UTM (670.793 mT, 9.150.137 mS) elevasi 901 m dpl, temperatur 50°C, pH 5,87 (Kelompok Penyelidikan Panasbumi PSDG, 2010).

2.2.2 Air Panas Coban

Air panas muncul pada elevasi 1348 m dpl., pada koordinat UTM (669.198 mT,9.146.104 mS), pada selasela lava andesit produk

vulkanik Arjuno-Welirang Tua dengan temperatur 39,4°C, temperatur udara 22,7°C, oksida besi, air panas jernih tidak berbau dan tidak berasa, pH 6,44, debit air panas kecil (0,1 l/detik), dengan oksida besi

yang cukup banyak (Kelompok Penyelidikan Panasbumi PSDG, 2010).

2.2.3 Air Panas Cangar

Air panas Cangar terdapat di dua lokasi dengan jarak yang tidak berjauhan hanya sekitar 100 meter. Air panas muncul pada batuan aliran piroklastik produk G.Kembar (Kembar II), air panas jernih, tidak berbau dan tidak berasa, lapisan sinter karbonat ditemukan tipis dan oksida besi lemah. Contoh air panas terdiri dari: Ap.Cangar 1 pada koordinat UTM (669.200 mT, 9.143.910 mS) elevasi 1611 m dpl., temperatur 54°C, pH 5,9, sedangkan Ap. Cangar 2 pada koordinat UTM (669.111 mT, 9.143.892 mS) elevasi 1604 m dpl. temperatur 48,3°C, pH 6,0 (Kelompok Penyelidikan Panasbumi PSDG, 2010).

2.2.4 Fumarol

Sebaran fumarol berada di masing - masing puncak kerucut kompleks Gn.Arjuno - Welirang seperti di kawah Gn.Arjuno, Gn.Kembar I, Kembar II dan kawah Gn.Welirang (Plupuh dan Jero). Temperatur terukur dilakukan di Kawah Plupuh dengan kisaran antara 94,1 - 137,5°C, pada temperatur udara 17,2 °C, hembusan kuat, beberapa tempat disertai sublimasi belerang membentuk solfatara. Solfatara/ fumarol Gn. Welirang terdapat pada elevasi 3050- 3150 mdpl (Kelompok Penyelidikan Panasbumi PSDG, 2010).

2.2.5 Alterasi

Sebaran alterasi batuan terbagi di dua lokasi yaitu di sekitar Kawah Plupuh, dan di bawah Gn. Pundak. Alterasi yang muncul di sekitar kawah memiliki penyebaran yang cukup luas, ± 1 km hingga ke lereng Welirang - Kembar I. Alterasi yang nampak berwarna keputihputihan, kemerahan, abu-abu, dan kecoklatan. Daerah Alterasi di sekitar Kawah Plupuh dicirikan dengan kehadiran mineral ubahan yang didominasi oleh mineral alunit, halloysit dan kaolinit

dengan intensitas kuat, disamping itu terdapat pula oksida besi dalam jumlah yang cukup tinggi. Berdasarkan kehadirannya dapat diinterpretasikan bahwa di daerah tersebut telah terbentuk alterasi hidrotermal yang dipengaruhi oleh fluida asam dengan temperatur pembentukan $< 200^{\circ}\text{C}$. Zona ubahan termasuk kedalam Argilik lanjut (*Advance Argillic*). Alterasi lainnya berada di sekitar Gunung Pundak, Desa Claket pada koordinat (672529 mT, 9150021 mS) dengan elevasi di atas 1000 m. Alterasi berwarna keputih-putihan pada lava produk Gn.Pundak yang merupakan erupsi samping, luas alterasi $\pm 0,5 \text{ km}^2$. Karakteristik dicirikan oleh batuan lava andesit, porfiritik, berwarna putih kecoklatan dengan spot hitam dari mineral piroksen. Masih nampaknya fenokris pada tekstur lava menunjukkan batuan telah mengalami alterasi dengan tingkatan lemah - sedang. Hasil *Portable Infrared Mineral Analyser* (PIMA) menunjukkan bahwa mineral alterasi yang terbentuk adalah montmorilonit. Data tersebut menunjukkan bahwa alterasi yang ada diakibatkan oleh pengaruh fluida panas dengan pH netral dan kisaran temperatur pembentukan $< 150^{\circ}\text{C}$. Zona ubahan termasuk kedalam zona argilik (Kelompok Penyelidikan Panasbumi PSDG, 2010).

2.3 Tinjauan Geokimia Arjuno-Welirang

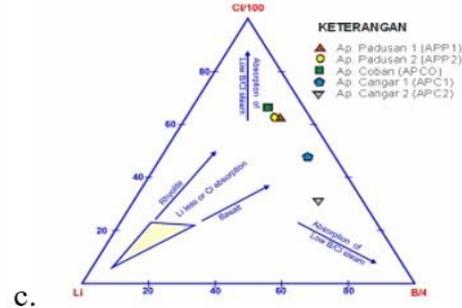
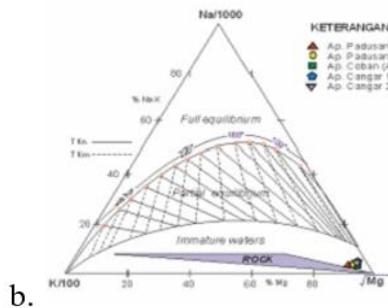
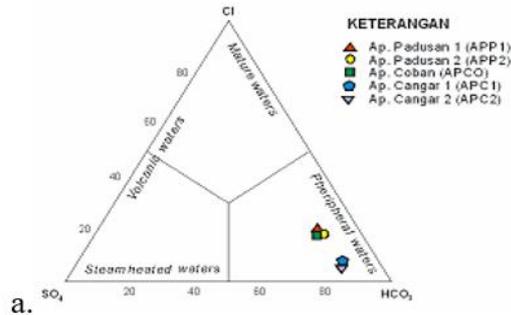
2.3.1 Kimia Air

Mata air panas di daerah penyelidikan G. Arjuno Welirang terdistribusi pada elevasi lebih rendah dan temperatur air panas lebih rendah dari pada di lokasi fumarol dan solfatara. Komposisi kimia dari mata air panas di plot pada diagram segi tiga $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$, Na-K-Mg, dan Cl-Li-B yang mengacu kepada Giggenbach (1988), Berdasarkan diagram Cl- $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ (**Gambar 2.2a**), air panas Padusan, air panas Coban, dan air panas Cangar bertipe bikarbonat. Hal tersebut mengindikasikan telah terjadinya pencampuran air permukaan terhadap fluida panas dari sistem panas bumi yang mengandung gas CO_2 pada pembentuk mata air panas yang muncul ke permukaan. Berdasarkan diagram segitiga Na-K-Mg (**Gambar 2.2b**), semua mata air panas terletak pada zona *immature water*, sebagai indikasi adanya pengaruh air permukaan yang tercampur dengan fluida panas pada pembentukan mata air panas. Selain itu air panas dipengaruhi interaksi antara fluida dengan batuan

dalam keadaan panas. Berdasarkan diagram segitiga Cl- Li-B (**Gambar 2.2c**), posisi semua mata air panas cenderung ke arah Cl-B, ada indikasi air panas berinteraksi dengan batuan sedimen sebelum mencapai permukaan (Kelompok Penyelidikan Panasbumi PSDG, 2010).

2.3.2 Komposisi Gas

Pada fumarol G. Arjuno Welirang tercium bau gas H₂S sangat menyengat, dan suara desis yang kuat. Gas-gas yang terdeteksi adalah CO₂, H₂S, SO₂, O₂, Ar, dan N₂, yang dinyatakan dalam konsentrasi %mol. Dengan konsentrasi didominasi oleh kandungan gas CO₂, H₂S, dan SO₂ dibandingkan gas-gas lainnya yang relatif sangat kecil. Adanya gas H₂S dan SO₂ mengindikasikan daerah tersebut berada pada lingkungan vulkanik. Sementara gas N₂ dimungkinkan dari degradasi materi organik pada kerak bumi yang berinteraksi dengan magma (Kelompok Penyelidikan Panasbumi PSDG, 2010).



Gambar 2.2 (a) Diagram Segitiga Cl - SO₄ - HCO₃, (b) Diagram Segitiga Na - K - Mg, dan (c) Diagram Segitiga Cl - Li - B (Tim Kelompok Penyelidikan Panasbumi PSDG, 2010)

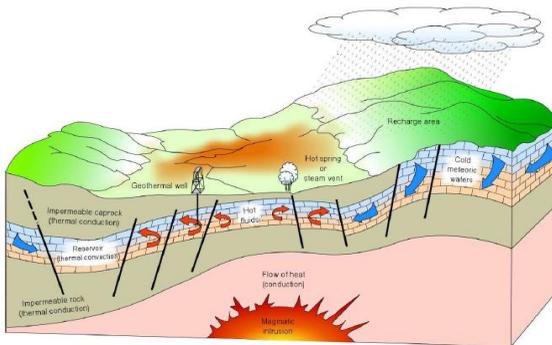
2.4 Sistem Panasbumi

Energi panasbumi adalah energi panas yang tersimpan dalam batuan di bawah permukaan bumi dan fluida yang terkandung di dalamnya. Sedangkan sumber energi panasbumi berasal dari distribusi suhu dan energi panas di bawah permukaan bumi (Aulia,2014).

Pada dasarnya sistem panasbumi terbentuk sebagai hasil perpindahan panas dari suatu sumber panas sekelilingnya yang terjadi secara konduksi dan konveksi. Perpindahan panas secara konduksi terjadi melalui batuan, sedangkan perpindahan panas secara konveksi karena kontak air dengan suatu sumber panas (Aulia,2014).

2.4.1 Skema Sistem Panasbumi

Sistem panasbumi dapat digambarkan sebagai konveksi fluida pada kerak bumi teratas, dimana dalam ruang terperangkap, transfer panas dari sumber panas (*heat source*) ke penyimpanan panas dalam keadaan permukaan yang bebas (*free surface*). Sistem panasbumi sendiri umumnya dibangun atas lima elemen utama, yaitu: *heat source*, *reservoir*, lapisan penudung, struktur geologi yang biasanya merupakan patahan dan terakhir adalah fluida yang merupakan pembawa panas **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3 Skema Sistem Panasbumi Ideal (Dickson dkk.,2004)

Heat source merupakan sumber panas dari sistem panasbumi. *Heat source* bisa merupakan intrusi *magmatik* yang memiliki suhu yang sangat tinggi ($>600\text{ }^{\circ}\text{C}$) dimana kedalamannya

yang relatif dangkal (3-5 km). *Reservoir* merupakan volume dari *hot permeable rocks*, tempat menyimpan panas dan tempat sirkulasi fluida yang mengekstrak panas. Di atas *reservoir* terdapat lapisan penutup atau biasa disebut *cap rocks* yang merupakan lapisan *clay*. Lapisan *clay* merupakan lapisan impermeabel yang berfungsi untuk menjaga panas agar tetap terakumulasi di dalam zona *reservoir*. Fluida panasbumi adalah air, sebagian besar merupakan air *meteoric*. Sedangkan struktur geologi yang dimaksud merupakan rekahan atau patahan yang akan menjadi jalur dilaluinya fluida dari permukaan menuju *reservoir* atau jalur yang akan dilalui uap panas atau fluida panas dari *reservoir* menuju permukaan dalam bentuk manifestasi permukaan. Terakhir adalah fluida dalam hal ini merupakan air sebagai media penyimpanan panas (Dickson dkk., 2004).

Menurut White (1973), fluida berasal dari air *meteoric* yang masuk ke batuan bawah permukaan melalui rekahan atau lapisan batuan yang permeabel. Sampai di bawah permukaan, air *meteoric* akan menjadi panas jika terjadi kontak dengan *heat source*. Karena air panas memiliki densitas yang rendah maka ia cenderung bergerak ke atas melalui rekahan atau lapisan batuan permeabel dan akan muncul di permukaan sebagai *geyser* atau manifestasi permukaan lainnya. Perubahan fasa bisa terjadi dalam perjalanannya, yaitu pada saat temperatur air telah mencapai temperatur saturasinya atau temperatur titik didihnya, maka fluida akan berupa campuran uap-air. Bila pada kedalaman tertentu temperatur air lebih besar dari temperatur saturasinya maka di dalam sistem hanya terdapat satu fasa saja, yaitu fasa uap. Sehingga manifestasi panasbumi di permukaan merupakan ekspresi permukaan dari sistem konveksi yang sangat besar.

2.4.2 Klasifikasi sistem panasbumi

Kriteria yang biasa digunakan untuk mengklasifikasi sumber daya panasbumi berdasarkan *enthalpy* yang menunjukkan energi panas yang dimiliki oleh fluida. Namun, pada kenyataannya pengklasifikasiannya tidak berdasarkan harga *enthalpy* melainkan berdasarkan temperatur karena *enthalpy* merupakan fungsi dari temperatur itu sendiri.

Tabel 2.1 Klasifikasi Sistem Panas Bumi Berdasarkan Temperatur Hochstein (Dickson dkk., 2004)

Resources	Temperatur
<i>Low Enthalpy</i>	<125°C
<i>Interpediate Enthalpy</i>	125 – 225 °C
<i>High Enthalpy</i>	>225 °C

Berdasarkan jenis fluida produksi dan jenis kandungan utamanya, sistem *hydrothermal* dibedakan menjadi dua, yaitu sistem satu fasa dan sistem dua fasa. Pada sistem satu fasa, sistem umumnya berisi air yang mempunyai temperatur 90 – 180 °C dan tidak terjadi pendidihan selama eksploitasi. Sistem dua fasa dibagi menjadi dua, yaitu sistem dominansi uap (*vapour dominated system*) dan sistem dominansi air (*water dominated system*) (Dickson dkk., 2004) .

1. *Vapour dominated system*, yaitu sistem panasbumi dimana sumur - sumurnya memproduksi uap kering atau uap basah karena rongga-rongga batuan *reservoir*-nya sebagian besar berupa uap panas. Dalam sistem ini uap mengisi rongga-rongga atau rekahan-rekahan, sedangkan air mengisi pori-pori batuan
2. *Water dominated system*, yaitu sistem panasbumi dimana sumur-sumurnya menghasilkan fluida dua fasa berupa campuran uap-air. Dalam sistem dominansi air, air mengisi rongga-rongga atau rekahan-rekahan.

2.5 Metode Magnetotellurik

Metode magnetotellurik (MT) merupakan metode pasif yang memanfaatkan medan elektromagnetik alam untuk menggambarkan keadaan bawah permukaan bumi, mulai dari kedalaman beberapa puluh meter hingga ratusan kilometer (Telford dkk., 1990). Medan magnet yang diukur berasal dari dalam dan luar bumi. Sumber dari dalam bumi (*internal*) berasal dari aktifitas pada inti bumi dan *remnant magnetization* pada batuan kerak (*crustal rock*). Sumber dari luar (*external*) dihasilkan dari atmosfer dan magnetosfer. Tetapi variasi komponen internal dari sumber medan magnet ini sangat lemah (frekuensinya rendah), akibatnya hanya variasi eksternal yang digunakan dalam metode MT. Frekuensi yang

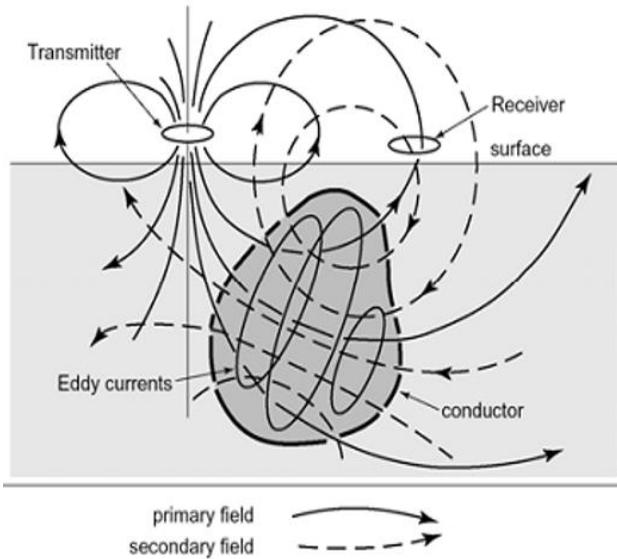
dihasilkan diklasifikasikan lagi menjadi frekuensi tinggi (diatas 1 Hz) dan frekuensi rendah (dibawah 1 Hz) (Unsworth, 2008).

Sinyal MT frekuensi tinggi berasal dari aktifitas meteorologi seperti petir atau kilat (*lightening*) yang terjadi antara lapisan atmosfer bagian bawah dengan permukaan bumi. Sinyal yang dihasilkan dikenal sebagai *sferics* (Simpson dan Bahr, 2005).

Sinyal MT yang memiliki frekuensi rendah (dibawah 1 Hz), berasal dari magnetosfer yang merupakan hasil interkasi antara *solar wind* dengan magnetosfer dan dengan ionosfer (Simpson dan Bahr, 2005). Magnetosfer adalah wilayah disekitar bumi dimana medan magnet utama bumi ditekan dan terperangkap oleh *solar wind* (Vozoff, 1991).

Saat *solar wind* dalam keadaan aktif, medan magnet bumi dapat dikatakan menjadi terganggu. Pada saat tersebut terjadi badai magnetik dimana terjadi sistem arus pada suatu waktu sepanjang hari. Adanya fenomena tersebut menyebabkan perubahan medan magnet bumi yang terukur dipermukaan bumi sekitar 100 nT. Gangguan medan magnet dalam skala yang lebih kecil juga dapat terjadi ketika adanya badai magnetik pada waktu yang relatif singkat (Unsworth, 2008).

Medan magnet yang berasal dari kedua sumber sinyal MT (frekuensi tinggi dan rendah) tadi sampai ke permukaan bumi dan meng-induksi arus dalam permukaan bumi. Arus tersebut dikenal dengan arus telurik (*telluric current*). Medan magnet yang berasal dari kedua sumber sinyal MT ini dinamakan medan magnet primer (*primary magnetic field*). Dari arus telurik tersebut, menghasilkan medan magnet sekunder (*secondary magnetic field*), keduanya akan direkam oleh *receiver* (**Gambar 2.4**). Pada lapisan yang konduktif (contoh : *ore body*) di bawah permukaan bumi, induksi medan magnet menyebabkan timbulnya arus eddy (*eddy current*), yang selanjutnya juga akan menghasilkan medan magnet sekunder (Unsworth, 2008).



Gambar 2.4 Proses Interaksi Gelombang Elektromagnetik dengan Bumi

Untuk memahami sifat dan atenuasi gelombang elektromagnetik dibutuhkan persamaan Maxwell dalam bentuk yang berkaitan dengan medan listrik dan magnet (Telford dkk., 1990) :

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

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

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \mathbf{q} \quad (\text{Hukum Gauss}) \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{Hukum Kontinuitas Fluks Magnet}) \quad (2.4)$$

dimana \mathbf{J} merupakan rapat arus (A/m^2), \mathbf{E} adalah intensitas medan listrik (V/m), \mathbf{B} adalah rapat fluks magnet [tesla(T)], \mathbf{H} adalah intensitas medan magnet (A/m), \mathbf{D} adalah pergeseran arus (C/m^2), dan \mathbf{q} adalah rapat muatan listrik (Coulomb/m^3). Hukum Faraday pada persamaan (2.1) menjelaskan bahwa adanya perubahan medan

magnet terhadap waktu akan menyebabkan terbentuknya medan listrik. Hukum Ampere pada persamaan (2.2) menjelaskan bahwa medan magnet tidak hanya terjadi karena adanya sumber arus listrik, namun dapat terjadi juga karena pengaruh perubahan medan listrik terhadap waktu sehingga menginduksi medan magnet. Hukum Gauss persamaan (2.3) menjelaskan bahwa fluks elektrik pada suatu ruang sebanding dengan muatan total yang ada dalam ruang tersebut, sedangkan Hukum Kontinuitas Fluks Magnet persamaan (2.4) menyatakan bahwa tidak ada medan magnet yang bersifat monopoli (Telford dkk., 1990).

2.5.1 Skin Depth

Skin depth didefinisikan sebagai kedalaman pada suatu medium homogen dimana amplitudo gelombang EM telah tereduksi menjadi $1/e$ dari amplitudonya di permukaan bumi ($\ln e = 1$ atau $e = 2.718 \dots$). Besaran tersebut dirumuskan sebagai berikut (Vozoff, 1991) :

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} \approx 500\sqrt{\rho T} \text{ (m)} \quad (2.5)$$

dimana ρ adalah tahanan-jenis medium homogen atau ekuivalensinya, $\omega = 2\pi f$ dan $\mu_0 = 4\pi (1 \times 10^{-7})$. Besaran *skin depth* digunakan untuk memperkirakan kedalaman penetrasi atau kedalaman investigasi gelombang EM (Vozoff, 1991).

2.5.2 Impedansi

Impedansi didefinisikan sebagai perbandingan antara komponen medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus dapat diperoleh dari persamaan (2.6) dan (2.7) (Grandis, 2010) :

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{i\omega \mu_0 \rho} \quad (2.6)$$

$$Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x} = -\sqrt{i\omega \mu_0 \rho} \quad (2.7)$$

Berdasarkan persamaan tersebut di atas, impedansi bumi homogen adalah suatu bilangan skalar kompleks yang merupakan fungsi tahanan-jenis medium dan frekuensi gelombang EM. Dalam hal ini impedansi yang diperoleh dari dua pasangan komponen medan listrik dan medan magnet yang berbeda (E_x/H_y dan E_y/H_x) secara numerik berharga sama mengingat simetri radial medium homogen atau medium 1-Dimensi. Untuk selanjutnya impedansi bumi homogen disebut impedansi intrinsik ($Z_t = Z_{xy} = -Z_{yx}$) (Grandis,2010).

2.5.3 Resistivitas Semu

Pada kenyataannya, nilai resistivitas bumi tidak akan konstan. Dalam hal ini, nilai resistivitas semu didefinisikan sebagai sebuah fungsi frekuensi (ω) yang dinyatakan pada persamaan (2.8) (Unsworth, 2016) :

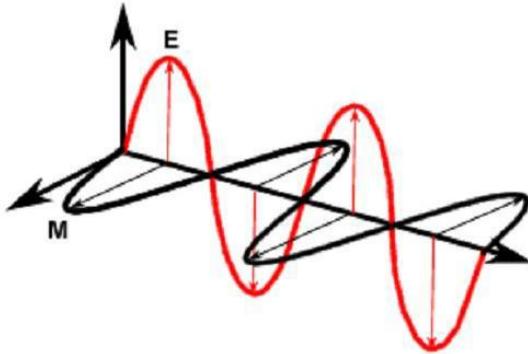
$$\rho_a(\omega) = \frac{1}{\omega\mu_0} \left| \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \right|^2 \quad (2.8)$$

Jika bumi memiliki sebuah nilai resistivitas yang seragam, perumusan (2.8) menunjukkan bahwa $\rho_a = \rho_1$. Pada umumnya, nilai resistivitas tidak akan konstan terhadap kedalaman. Dalam hal ini, resistivitas semu dapat didasarkan pada nilai resistivitas rata-rata di atas atmosphere dengan jarak yang sama terhadap kedalaman penetrasi (Unsworth, 2016).

2.5.4 Fase

$$\Phi(\omega) = \tan^{-1}[Z_{xy}(\omega)] = \tan^{-1} \left| \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \right| \quad (2.9)$$

Fase $Z_{xy}(\omega)$ merupakan sudut fase antara $E_x(\omega)$ dan $H_y(\omega)$. Untuk gelombang elektromagnetik yang melalui ruang hampa E_x dan H_y . Fasenya akan menjadi $\Phi(\omega) = 0$ (Unsworth,2016).



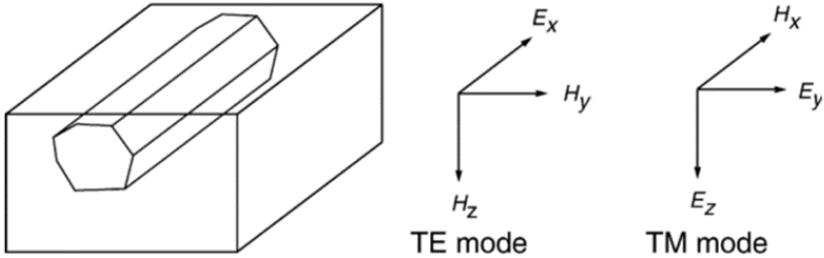
Gambar 2.5 Hubungan Gelombang Listrik dan Magnet (Unsworth, 2016).

Besar nilai fase merupakan besarnya nilai sudut fase antara medan listrik dan medan magnet. Metode magnetotelurik sensitif terhadap perubahan resistivitas dengan kedalaman, ketika resistivitas meningkat dengan kedalaman fase kurang $\frac{\pi}{4}$ dari ketika resistivitas menurun dengan kedalaman, fase lebih besar dari $\frac{\pi}{4}$ (Unsworth, 2016).

2.5.5 Mode Pengukuran

Untuk merekam gelombang elektromagnetik, maka digunakan dua jenis sensor saat akuisisi, yaitu sensor elektrik dan sensor magnetik yang saling tegak lurus. Cara peletakan sensor elektrik dan sensor magnetik menghasilkan dua jenis mode pengukuran, seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 2.6**.

Mode pertama adalah *Transverse Electric Mode* (TE mode), dimana komponen medan listrik searah dengan arah *strike* atau searah dengan struktur (arah sumbu x) dan komponen medan magnet berada pada bidang y-z. Adapun mode yang kedua adalah *Transverse Magnetic Mode* (TM mode), dimana komponen medan listrik tegak lurus dengan arah *strike* atau tegak lurus terhadap struktur (bidang y-z) dan komponen medan magnet berada pada sumbu x (Vozoff, 1991).



Gambar 2.6 Mode Pengukuran dalam Metode Magnetotellurik (Vozoff, 1991)

Parameter yang dianalisa adalah *apparent resistivity* (ρ) dan *phase* (ϕ). Persamaan *apparent resistivity* didasari oleh nilai impedansi gelombang. Hal ini menyebabkan terdapatnya dua mode pengukuran, sehingga terdapat dua nilai *apparent resistivity* pula yaitu ρ_{xy} (TE mode) dan ρ_{yx} (TM mode). Sementara itu untuk persamaan *apparent resistivity* (ρ) dan *phase* (ϕ) pada TE dan TM mode dinyatakan pada persamaan (2.10) dan (2.11) (Xiao, 2004):

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu_0} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad \rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu_0} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad (2.10)$$

$$\phi_{xy} = \tan^{-1} \left| \frac{E_x}{H_y} \right| \quad \phi_{yx} = \tan^{-1} \left| \frac{E_y}{H_x} \right| \quad (2.11)$$

Arus listrik yang ada pada TE mode menyebabkan timbulnya medan magnet vertikal. Sebagai contoh kasus, terdapat suatu benda konduktif pada arah sumbu-x. Arus akan menginduksi benda tersebut, sehingga menyebabkan timbulnya medan magnetik yang arah vektornya. Adanya fenomena tersebut dapat digunakan untuk menggambarkan struktur resistivitas bawah permukaan dengan menghitung arah vektor induksi dengan persamaan (2.12) dan (2.13) (Xiao,2004) :

$$\vec{I}_y = \frac{\vec{H}_z}{H_y} \quad (2.12)$$

$$\vec{I}_x = \frac{\vec{H}_z}{H_x} \quad (2.13)$$

2.5.6 Rotasi

Pada kasus 2-Dimensi dan 3-Dimensi, ada beberapa factor yang harus diperhatikan karena berkaitan dengan data yang dihasilkan. Seperti arah struktur (*strike*). Untuk menggambarkan efeknya, terlebih dahulu ditinjau konsep tensor impedansi. Hubungan medan listrik dan medan magnet dituliskan sebagai berikut (Xiao, 2004) :

$$E_x = Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y \quad (2.14)$$

$$E_y = Z_{yy}H_y + Z_{yx}H_x \quad (2.15)$$

Pada kasus 1-Dimensi Z_{xx} dan Z_{yy} adalah nol. Untuk kasus 2-Dimensi, jika x atau y sejajar dengan *strike*, maka $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$, maka $E_x = Z_{xy}H_y$, dan formula matematis untuk menghitung resistivitas menjadi sederhana, yaitu (Xiao, 2004) :

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_{xy}|^2 \quad (2.16)$$

Tetapi jika x atau y tidak sejajar dengan *strike*, $Z_{xx} = -Z_{yy} \neq 0$. Maka untuk mendapatkan nilai resistivitas, formula matematikanya lebih kompleks. Oleh karena itu, menjadi sangat perlu dalam pengolahan data, menentukan arah *strike* pada daerah penelitian. Dan merotasi data agar sejajar dengan arah *strike* (Xiao, 2004).

2.5.7 Pergeseran Statik

Gelombang Elektromagnetik akan menghasilkan data (data magnetotellurik) yang mudah mengalami distorsi baik pada kurva TE maupun TM nya. Distorsi tersebut akibat adanya perbedaan nilai resistivitas pada satu lapisan yang mengakibatkan interpretasi data menjadi ambigu. Pada suatu medium atau lapisan yang di dalam bagian medium tersebut terdapat suatu medium yang memiliki perbedaan nilai resistivitasnya maka medium tersebut mengalami pergeseran statik. Beberapa kategori medium yang mengalami

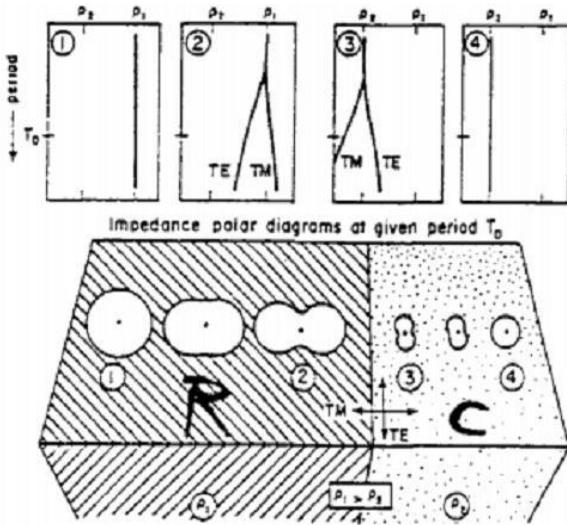
pergeseran statik akibat adanya perbedaan nilai resistivitas yakni pada kondisi sebagai berikut :

2.5.7.1 Heterogenitas di dekat permukaan

Daerah pengukuran magnetotellurik memiliki kondisi yang berbeda - beda. Pada kasus tertentu ditemukan fenomena bahwa di dekat permukaan akan mempunyai nilai tahanan jenis yang berbeda dengan lapisan di bawah ataupun di sekelilingnya. Perbedaan tersebut dapat menimbulkan distorsi pada data magnetotellurik (MT). Distorsi pada data MT akan ditandai dengan pergeseran kurva TE dan TM terhadap nilai regional yang sebenarnya (Grandis dan Hendro, 1996).

2.5.7.2 Kontak Vertikal

Efek statik yang diakibatkan oleh adanya kontak vertikal berupa struktur seperti patahan, terjadi pada periode tinggi dan akan terjadi pada semua periode jika berada tepat pada batas kontak vertikalnya.



Gambar 2.7 Hasil Pengukuran Akibat Kontak Vertikal (Vozoff, 1991).

Berdasarkan **Gambar 2.7**, terdapat dua kontak resistivitas yaitu ρ_1 dan ρ_2 , di mana $\rho_1 > \rho_2$. Terlihat bahwa pada pengukuran yang jauh dari kontak vertikal tidak terjadi efek statik, karena efek dari akumulasi muatan tidak berdampak pada stasiun pengukuran tersebut. Pada pengukuran yang mendekati atau bahkan tepat pada batas kontak vertikal, terjadi pergeseran dalam bentuk kurva TM yang berada di atas TE pada bagian yang lebih resistif dan sebaliknya (Vozoff, 1991).

2.5.7.3 Topografi

Pada daerah di dekat topografi tinggi (bukit) maupun topografi rendah (lembah) data MT juga mengalami pergeseran statik. Pergeseran statik pada daerah bukit yang tinggi, akan lebih besar daripada pergeseran statik pada daerah bukit yang rendah. Sedangkan pada daerah lembah pergeseran statik yang besar akan terjadi pada daerah lembah yang curam. Daerah bukit akan memberikan efek konduktif pada data, sedangkan daerah lembah akan memberikan efek resistif pada data. Pergeseran statik pada keadaan ini terjadi karena pergeseran kurva TM ke atas pada topografi tinggi dan ke bawah pada topografi rendah. Aliran medan listrik secara horizontal pada TM mode yang menyebabkan kurva tersebut mengalami pergeseran (Jiracek, 1985) .

2.6 Metode Koreksi Pergeseran statik

Untuk menghilangkan gangguan pada data MT yang disebabkan *static shift* yang antara lain disebabkan oleh inhomogenitas di dekat permukaan (kedalaman yang dangkal) dan pengaruh topografi yang tidak rata maka dilakukan koreksi *static shift*. Metode untuk mengoreksi efek ini ada beberapa cara, bisa dengan data TDEM, atau dengan formula matematis.

2.6.1 TDEM (*Time Domain Electromagnetic*)

Interpretasi atau permodelan terhadap data MT yang mengalami distorsi akan menghasilkan parameter model yang salah. Oleh karena itu, diperlukan pengkoreksian pada data MT tersebut. Metode “*Time Domain Electromagnetic*” (TDEM) merupakan salah satu metode yang sering digunakan pada koreksi data MT. Metode

ini hanya melibatkan pengukuran medan magnet sekunder akibat induksi medan magnet primer, sehingga TDEM relatif tidak terpengaruh oleh anomali konduktivitas lokal dekat permukaan (Grandis dan Hendro, 1996).

Pada pengukuran TDEM arus listrik DC mengalir melalui transmiter dipole (Tx) dan menghasilkan medan magnet primer yang statis, arus dari transmitter kemudian dimatikan (switched off) sehingga menyebabkan medan magnet primer langsung jatuh ke nol (cut off). Hal ini menyebabkan timbulnya arus listrik sekunder di bumi. Arus listrik sekunder bertindak untuk menentang penurunan medan magnet utama (Hukum Lenz). Data yang didapatkan yaitu hasil pengukuran perubahan medan magnet dan medan listrik sekunder terhadap waktu (Unsworth, 2006).

Data TDEM 1-Dimensi yang diperoleh, selanjutnya dibuat *forward modelling* terhadap kurva data MT, kemudian kurva data MT tersebut akan disesuaikan atau digeser terhadap kurva TDEM hasil *forward modelling*. Dengan demikian pergeseran statik secara vertikal dapat dihilangkan.

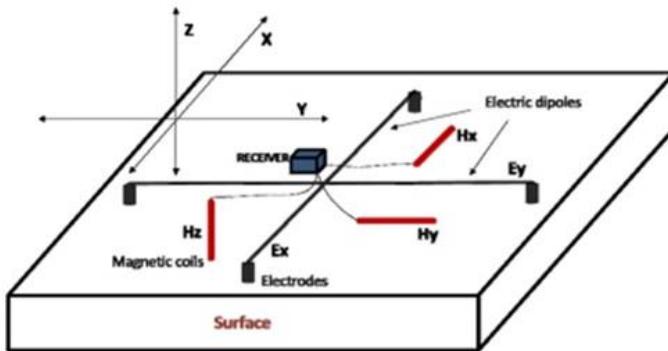
2.7 Akuisisi Data Magnetotellurik

Metode Magnetotellurik (MT) adalah teknik untuk menyelidiki struktur konduktivitas listrik dari bumi untuk kedalaman sampai 600km. Meskipun kurang dikenal dari seismologi, MT semakin digunakan baik dalam geofisika terapan dan riset dasar (Simpson dan Bahr, 2005).

Dalam pengukuran MT Secara umum disetiap titik pengukuran magnetotellurik dipasang tiga koil magnetik (H_x , H_y , dan H_z) dan empat buah *porous pot* (2 untuk E_x dan 2 untuk E_y) seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 2.8**.

Pada proses akuisisi, hal penting yang harus diperhatikan adalah penentuan sistem koordinat. Penentuan sistem koordinat didasarkan pada arah sejajar atau tegak lurus dengan *strike*. Secara umum, arah *strike* didefinisikan sebagai arah Utara-Selatan dalam sistem koordinat (Green, 2003). Tiga buah koil magnetik (H_x , H_y , dan H_z) ditanam pada kuadran berbeda sehingga setiap koil dapat merekam secara orthogonal komponen medan magnet x , y dan z . Koil H_x dan H_y ditanam secara horizontal di tanah, sedangkan koil H_z ditanam secara vertikal. Koil H_x ditanam dengan arah Utara-Selatan

dengan kabel konektor ke arah Selatan, sedangkan koil H_y ditanam dengan arah Timur-Barat dengan kabel konektor ke arah Barat. Jarak bentangan koil H_x , H_y , dan H_z sejauh panjang maksimum dari kabel koil dari *control unit*. Sementara itu sensor medan listrik E_x ditanam dalam arah Utara-Selatan dan Sensor medan listrik E_y ditanam dalam arah Timur-Barat dengan jarak bentangan disesuaikan dengan lokasi pengukuran. GPS diletakkan di dekat *control unit* pada ketinggian ± 2 m dan dihubungkan ke *control unit* (Dewi, 2015).



Gambar 2.8 Konfigurasi Alat Pengukuran MT (Zanuar, 2009)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)