

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Geologi Bangka

##### 2.1.1 Fisiografis Pulau Bangka

Secara fisiografis, Pulau Bangka merupakan bagian yang terangkat dari paparan Sunda. Pulau dengan luas 11.534,142 km<sup>2</sup> ini dikelilingi oleh Pulau Sumatera dan Selat Bangka di sebelah barat daya, Pulau Belitung di sebelah timur, Pulau Kalimantan di sebelah timur laut, Kepulauan Riau di sebelah barat laut, Pulau Anambas dan Laut Cina Selatan di sebelah utara serta Laut Jawa di sebelah tenggara. Penyebaran timah di Pulau Bangka merupakan kelanjutan dari Tin Mayor South East Asian Tin Belt bagian tengah, yang membentang mulai dari Birma, Thailand dan Malaysia hingga berakhir di Indonesia. Sabuk timah tersebut diperkirakan berumur Trias dan didominasi oleh Granit tipe S. Adapun sabuk tin belt ini di gambarkan pada Gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Jalur timah asia tenggara[9]

Jalur timah Indonesia berupa deretan pulau-pulau yang bertebaran dengan kecenderungan arah barat laut tenggara, dimulai dari Pulau Karimun, Pulau Kundur, Pulau Singkep, Pulau Bangka, Pulau Belitung, dan Pulau Karimata. Pada jalur tersebut sekitar sepertiga bagiannya merupakan daratan (pulau-pulau) yang diperkirakan merupakan bagian resisten yang tersisa selama proses erosi *Sunda Shelf*, sedangkan sisanya tertutupi oleh lautan[10].

### **2.1.2 Stratigrafi Bangka**

Pada peta Geologi Lembar Bangka Utara dan Selatan, Sumatra, dengan skala 1 : 250.000, Stratigrafi regional Pulau Bangka diurutkan dari tua ke muda yaitu tersusun oleh Kompleks Pemali (CpP), Formasi Tanjung Genting (Trt), Granit Klabat (TrJkg), Formasi Ranggung (TQr) dan Alluvium (Qa)[10][11]. Adapun penjelasan sebagai berikut :

#### **a. Kelompok Pemali (CpP)**

Terdiri dari skiss, phillit, batulempung, rijang, tuff, gneiss, sisipan kuarsit dan lensa batugamping. Batuan tersebut berstruktur sedimen masif, dengan kandungan fosil berupa Fusulinidae dan Radiolaria. Batuannya terlipat kuat, terkekarkan dan terpatahkan. Kompleks yang berumur Perm ini secara umum diterobos oleh Granit Klabat.

#### **b. Formasi Tanjung Genting (Trt)**

Berupa perselingan batupasir termetamorfkan dan batupasir lempungan dengan lensa batugamping. Batuan berumur Trias tersebut berstruktur sedimen silang siur dan mengandung fosil *Montlivaltia moluccana*, *Perodinella* sp., *Entrochus* sp., dan *Encrinus* sp. Formasi ini terlipat kuat, terkekarkan dan terpatahkan dan berada tidak selaras di atas Kelompok Pemali serta diterobos pula oleh Granit Klabat

c. Satuan Granit Klabat (TrJkg)

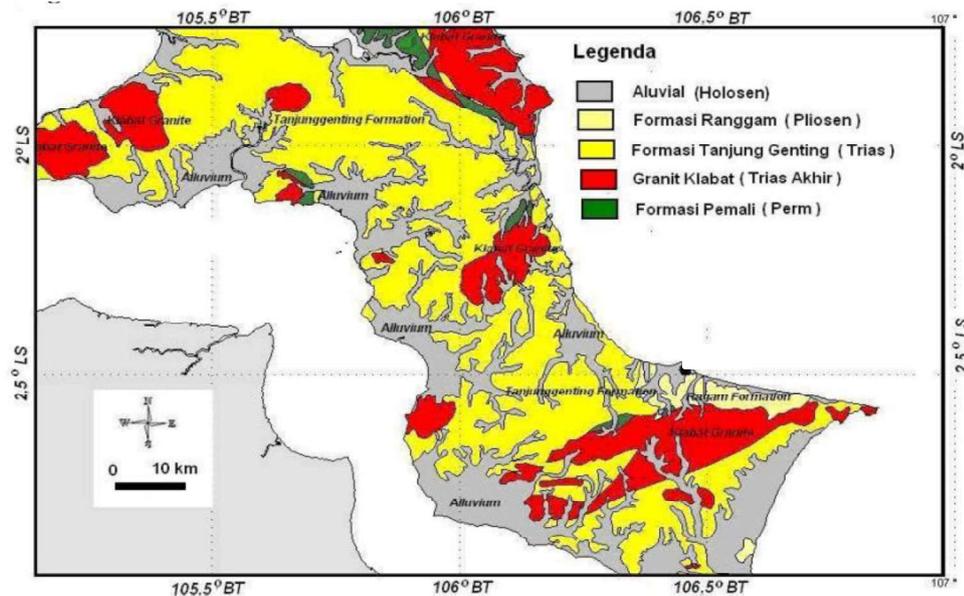
Terdiri dari granit, granodiorit, diorite dan diorite kuarsa. Granit berumur Trias Akhir –Yura Awal ini menerobos Kelompok Pemali dan Formasi Tanjung Genting di atasnya. Terkadang dijumpai singkapan granit yang telah lapuk. Terdapat pula granit segar yang tersingkap sebagai tonjolan blok - blok (boulder) granit yang tersebar di pantai.

d. Formasi Ranggam (TQr)

Terdiri dari perselingan batupasir, batulempung, dengan sisipan lapisan tipis batulanau dan organic matter. Batuan tersebut memiliki struktur sedimen perlapisan dan silang siur serta mengandung fosil Molusca berupa *Turitellaterbra* sp., *Olivia triciment* mzt., *Cypraea sonderavamart* dan fosil Foraminifera Bentos berupa *Celathus creticulatus*, *Ammonia* sp. , *Celcarina* sp. dan *Triculina* sp. serta geraham gigi gajah berumur Pleistosen, Formasi berumur Miosen Akhir ini berada tidak selaras di atas Granit Klabat.

e. Alluvium (Qa)

Berupa endapan rawa dan endapan sungai yang terdiri dari material lepas dan tersebar mengikuti aliran sungai disepanjang lembah maupun pantai. Satuan yang berumur Quarter ini berada tidak selaras di atas Formasi Ranggam. Peta Geologi Pulau Bangka digambarkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Peta Geologi Pulau Bangka oleh [12]

### 2.1.3 Tektonik Regional Pulau Bangka

Pulau Bangka pada awal Paleozoik berhubungan erat dengan tektonik yang membentuk Semenanjung Malaya dan umumnya terrane Asia Tenggara (Sundaland) yang berasal dari Gondwana. Blok-blok benua yang membentuk Paparan Sunda meliputi Blok Malaya Timur, Indo China, Sibumasu, *West* Burma dan SW Borneo dari batas timur Gondwana seiring dengan terbukanya Paleo-Tethys selama Paleozoikum hingga Kenozoikum yang menghasilkan tumbukan antara Sibumasu dan Malaya Timur-Indochina. Pulau Timah berada sepanjang Zona Suture Bentong-Raub utama yang membuat batas antara timur dan Terranes Malaya Sibumasu. Suture.

Suture Bentong-Raub adalah salah satu sisa-sisa deformasi yang paling dikenal dari kompleks akresi yang membentang di sepanjang Semenanjung Melayu melalui pulau timah, terkait dengan subduksi dan penutupan Paleo-Tethys, diikuti oleh tabrakan benua selama Trias- Jura Awal. Di Semenanjung Melayu, yang disebut Main (utama) *Province* Sabuk Granitoid Asia Tenggara yang terdiri dari granitoid S-type berumur Trias Akhir- Jurassic Awal. Sementara itu, di sisi timur dari Suture Raub- Bentong, granitoid didominasi oleh I-type yang usianya bervariasi dari Perm-Trias dan Kapur Atas, batuan ini secara kolektif diklasifikasikan sebagai sabuk Granitoid *Province* bagian Timur Asia Tenggara. Kegiatan tektonik ditafsirkan berlangsung sejak Perm, ditandai dengan pembentukan kompleks Malihan Pemali (CPp), kemudian periode Trias Awal terjadi penurunan dan pengendapan Formasi Tanjung Genting (Trt) di lingkungan laut dangkal. Berlanjut pada Trias Akhir-Jura Akhir terjadi pengangkatan dan penerobosan Granit Klabat (TrJkg). Setelah transgresi maksimum (Miosen Tengah), kemudian mulai tahap regresi oleh pengangkatan. Pengendapan kembali dimulai Kala Miosen Akhir-Pleistosen Awal berupa batuan Formasi Ranggalam (TQr) Selanjutnya pengangkatan, pendataran dan pengendapan aluvium sungai, rawa dan pantai berlangsung Kala Holosen [11].

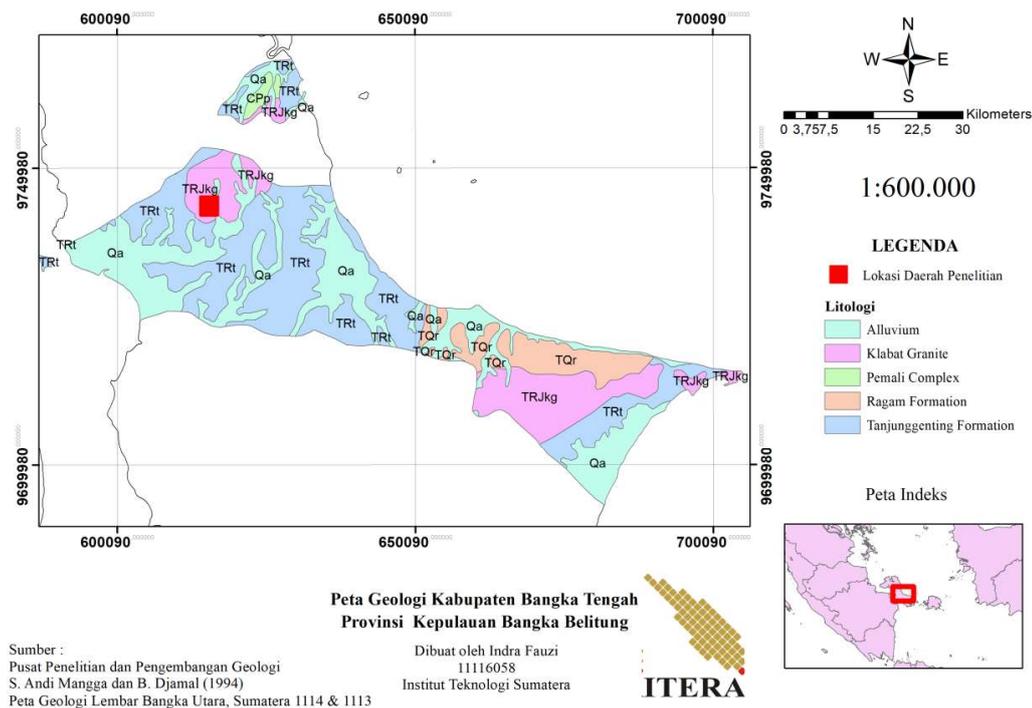
#### **2.1.4 Struktur Geologi Pulau Bangka**

Struktur geologi di Pulau Bangka meliputi kelurusan, kekar, lipatan dan patahan. Lipatan terjadi pada batuan berumur Perm dan Trias . Struktur sesar, kekar dan patahan memiliki banyak orientasi. Arah umum utara-selatan, timurlaut-baratdaya, dan tenggara-baratlaut. Pulau Bangka terdapat beberapa sesar yang umumnya berarah timur laut–barat daya dan utara–selatan. Sesar utama berarah N 30° E tersebut memotong granit Klabat ke arah selatan sepanjang 3 km[10].

Lipatan batuan meliputi Formasi Tanjung Genting dan Formasi Ranggalang, mempunyai arah sumbu timurlaut-baratdaya dan kemiringan besar antara 18°-75°, yang menunjukkan intensitas tektonik besar . Patahan dan kekar tersebut berkaitan erat terhadap perlipatan . Patahan berupa patahan naik, geser dan patahan normal. Pola patahan berarah utara-selatan merupakan fase patahan paling muda . Patahan naik dan normal mempunyai arah relatif baratlaut-tenggara, serta patahan mendatar dengan arah relatif utara-selatan memotong patahan lebih tua [11].

#### **2.1.5 Geologi daerah penelitian**

Daerah penelitian yang kemudian dilakukan pengukuran magnetik berada di Desa Keretak, Kecamatan Sungai Selan, Kabupaten Bangka Tengah, Provinsi Bangka Belitung. Secara geologi daerah ini masuk pada peta geologi lembar Bangka Utara, yang tersusun oleh batuan tertua yang diperkirakan diwakili oleh formasi tanjung genting di atasnya (TRt) ,disusul Granit Klabat (TRJkg), dan disusul Alluvium(Qa) diatas Granit Klabat [13]. Batuan pada daerah penelitian didominasi oleh singkapan batu granit yang tersingkap dipermukaan sekitar sumber mata air panas keretak. Peta geologi daerah penelitian digambarkan pada Gambar 2.3.

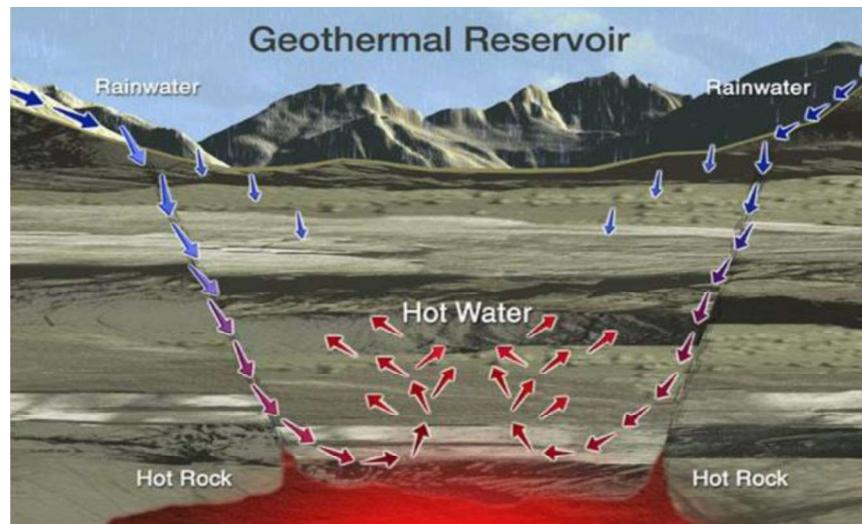


**Gambar 2.3** Peta Geologi Penelitian modifikasi dari [13]

## 2.2 Panasbumi dan sistem panasbumi Indonesia

Panasbumi merupakan jumlah kandungan panas yang tersimpan dalam bumi dan membentuk sistem panasbumi yang telah ada sejak bumi terbentuk [14]. Panasbumi merupakan sumber panas yang terkandung dalam air panas, uap air, serta batuan beserta mineral ikutan dan gas lainnya yang secara genetis tidak dapat dipisahkan dalam suatu sistem panas bumi [15]. Sistem panasbumi merupakan perpindahan panas secara alami dengan volume tertentu dari sumber panas (kerak bumi) ke tempat pelepasan panas yang secara umum adalah permukaan tanah. Panasbumi adalah energi panas yang tersimpan didalam dalam bumi. Secara umum dibawah permukaan bumi terdapat sumber panas, akan tetapi tidak semua lokasi menyimpan energi panasbumi (*geothermal*). Energi ini terdapat hanya pada lokasi yang memiliki sistem *geothermal* [16]. Sistem panasbumi (*geothermal*) mencakup sistem hidrotermal yang merupakan sistem tata-air, proses pemanasan, dan kondisi sistem dimana air yang terpanasi terkumpul, sehingga sistem panasbumi memiliki syarat seperti harus adanya air, batuan pemanas, batuan sarang, dan batuan penutup apabila terdapat daerah yang dapat dilalui oleh

*geothermal*, maka geothermal akan naik ke permukaan membentuk manifestasi *geothermal* [17]. Sistem panasbumi dapat di gambarkan pada Gambar 2.4.



**Gambar 2.4** Sistem panasbumi ideal [17]

Berdasarkan sumber panas, sistem panasbumi dibagi menjadi sistem vulkanik dan non vulkanik [18]. Sistem panasbumi non-vulkanik diantaranya *gradient* panas batuan sedimen, sirkulasi air dalam, ataupun intrusi batuan beku tua [19]. Geologi Indonesia berada di jalur vulkanik aktif dunia, menjadikan Indonesia memiliki potensi sumber daya alam yang melimpah[20]. Sistem panasbumi non vulkanik di Indonesia menurut [3] dikelompokkan menjadi :

1. Sistem panasbumi dilingkungan sedimen (cekungan dan geopressure)

Sistem yang terbentuk pada lingkungan sedimen berkaitan dengan pembentukan cekungan sedimen yang terisi secara cepat oleh produk sedimentasi, sehingga fluida hidrotermal yang terbentuk mengalami tekanan tinggi. Akuifer yang terbentuk pada cekungan sedimen sebagian terisi oleh air laut, hingga 60% dan terperangkap saat proses kompaksi dan litifikasi. Sedimentasinya sangat tebal, bisa mencapai 3 km s.d. 4 km, dan mengakibatkan akumulasi panas (*heat flow*). Daerah cekungan Sumatera, Jawa dan Kalimantan sangat berpotensi dalam pembentukan seperti tipe ini. Umumnya berhubungan dengan kawasan minyak dan gas bumi.

## 2. Sistem panasbumi intrusi – radiogenik

Sistem panas bumi intrusi - radiogenik berkaitan dengan peristiwa peluruhan unsur-unsur radioaktif seperti uranium, thorium dan potasium yang dapat menghasilkan sumber panas, daerah seperti ini biasanya didominasi oleh batuan granitic seperti di Bangka Belitung, dan Sulawesi Tengah.

## 3. Sistem panasbumi sesar – tektonik

Sistem panas bumi sesar – tektonik biasa disebut *heat sweep*. Berkaitan dengan zona sesar dan rekahan pada kedalaman di daerah yang memiliki *heat flow* yang tinggi. Umumnya terjadi pada tumbukan antar lempeng (*plate collision*), atau pada sesar aktif. Sumber panasnya berupa kerak benua yang mengalami deformasi. Di Indonesia banyak dijumpai di sepanjang Sesar Sumatera, Sesar Palu-Koro dan Sesar Sorong.

## 4. Sistem panasbumi vulkanik tua

Sistem panas bumi pada daerah vulkanik tua tidak terkait dengan gunung berapi Kuartar. Sumber panas diasumsikan sebagai sisa magma yang terakumulasi dari aliran panas konduktif, bukan magma cair gunung berapi Kuartar. Umumnya berhubungan dengan patahan aktif atau kaldera tua yang terkubur dan juga batuan intrusi. Beberapa lokasi di Jawa bagian selatan, Sumatera bagian barat dan Maluku menunjukkan sistem tersebut.

### 2.3 Manifestasi panasbumi (Geotermal)

Menurut [21] manifestasi permukaan adalah tanda-tanda alam yang nampak di permukaan tanah sebagai petunjuk awal adanya aktivitas panas bumi di bawah permukaan tanah. Bentuk manifestasi permukaan antara lain:

1. Tanah Panas (*Warm Ground*) yaitu adanya sumber daya panas bumi di bawah permukaan dapat ditunjukkan antara lain dari adanya tanah yang mempunyai temperatur lebih tinggi dari temperatur tanah di sekitarnya. Hal ini terjadi karena adanya perpindahan panas secara konduksi dari batuan bawah permukaan ke batuan permukaan.

2. Tanah Beruap (*Steaming Ground*) merupakan jenis manifestasi dimana uap panas (*steam*) keluar dari permukaan tanah. Uap tersebut berasal dari suatu lapisan tipis dekat permukaan yang mengandung air panas yang mempunyai temperatur sama atau lebih besar dari titik didihnya. Jika gradien temperatur lebih besar dari 300 °C/m, maka *steaming ground* sangat berbahaya bagi makhluk hidup karena temperatur yang sangat tinggi menyebabkan tumbuh tumbuhan tidak dapat hidup.

3. Kolam air panas merupakan salah satu petunjuk adanya sumber daya panas bumi di bawah permukaan. Kolam air panas terbentuk karena adanya aliran air panas dari bawah permukaan melalui rekahan-rekahan batuan. Pada permukaan air terjadi penguapan yang disebabkan karena adanya perpindahan panas dari permukaan air ke atmosfer. Panas yang hilang ke atmosfer sebanding dengan luas area kolam, temperatur pada permukaan dan kecepatan angin.

4. Kolam lumpur panas (*Mud Pool*) Kenampakannya sedikit mengandung uap dan gas CO<sub>2</sub>, tidak terkondensasi, umumnya fluida berasal dari kondensasi uap. Penambahan cairan lumpur menyebabkan gas CO<sub>2</sub> keluar. Mud vulkano adalah tipe dari kolam lumpur panas, dimana gas keluar dari satu celah dengan temperatur lebih kecil dari titik didih. Lumpur terdapat dalam keadaan cair karena kondensasi uap panas, sedangkan letupan-letupan yang terjadi adalah karena pancaran CO<sub>2</sub>.

5. Air Panas (*Hot Springs*) merupakan salah satu petunjuk adanya sumber daya panas bumi di bawah permukaan. Mata air panas terbentuk karena adanya aliran air panas dari bawah permukaan melalui rekahan-rekahan batuan. Air panas dengan temperatur 500 °C disebut *warm springs*. Temperatur > 500 °C disebut *hot springs*. *Hot springs* biasanya agak asam, bila netral umumnya berasosiasi dengan sistem air panas jenuh dengan silika dan menghasilkan endapan sinter. Endapan teras travetin biasanya berhubungan dengan karbonat yang terkandung dalam fluida.

6. *Fumarol* adalah lubang kecil yang memancarkan uap panas kering (*dry steam*) atau uap panas yang mengandung butiran-butiran air (*wet steam*). Apabila uap tersebut mengandung gas H<sub>2</sub>S maka manifestasi permukaan tersebut disebut solfatar. *Fumarol* yang memancarkan uap dengan kecepatan tinggi dapat dijumpai di daerah tempat terdapatnya sistem dominasi uap. Uap tersebut mengandung SO<sub>2</sub> yang hanya stabil pada temperatur yang sangat tinggi (>5000 °C). *Fumarol* yang memancarkan uap dengan kandungan asam boric tinggi umumnya disebut *soffioni*.

8. *Geyser* merupakan mata air panas yang menyembur ke udara secara intermitten (pada selang waktu tidak tentu) dengan ketinggian air sangat beraneka ragam, yaitu dari kurang dari satu meter hingga ratusan meter. Selang waktu penyemburan air (erupsi) juga beraneka ragam, yaitu dari beberapa detik hingga beberapa hari. Lamanya air menyembur ke permukaan juga sangat beraneka ragam, yaitu dari beberapa detik hingga beberapa jam. *Geyser* merupakan manifestasi permukaan dari sistem dominasi air.

9. Silika sinter merupakan endapan silika di permukaan yang berwarna kuning keperakan. Umumnya dijumpai di sekitar mata air panas dan lubang geyser yang menyemburkan air yang bersifat netral. Apabila laju aliran air panas tidak terlalu besar umumnya di sekitar mataair panas tersebut terbentuk teras-teras silika yang berwarna keperakan (*silica sinter terrace* atau *sinter platform*). Silika sinter merupakan manifestasi permukaan dari sistem panas bumi yang didominasi air.

#### **2.4 Penelitian terdahulu panasbumi Pulau Bangka**

Pulau Bangka merupakan daerah di Indonesia yang memiliki manifestasi panasbumi. Manifestasi panasbumi daerah pulau Bangka diperkirakan memiliki panasbumi bertipe radiogenik berupa mata air panas. Penelitian – penelitian telah dilakukan sebelumnya menggunakan metode geofisika dan juga geologi serta geokimia. Penelitian tersebut antara lain Pitulima dan Siregar (2016). Penelitian ini dilakukan didaerah manifestasi mata air panas Desa Nyelanding, Kecamatan

Air Gegas, Kabupaten Bangka Selatan, Provinsi Bangka Belitung. Penelitian ini menggunakan survei geofisika dengan metode geolistrik konfigurasi Wenner, dengan lintasan pengukuran berjumlah 3 lintasan.

Hasil dari penelitian tersebut didapatkan bahwa resistivitas bawah permukaan mata air panas Nyelanding sangat tinggi berkisar (45 – 1046  $\Omega\text{m}$ ). Pada ketiga penampang resistivitas pada 3 lintasan tersebut menunjukkan keberadaan batuan granit dengan nilai resistivitas 690 – 1046  $\Omega\text{m}$  kedalaman 2 – 2,5 meter. Sedangkan struktur bawah permukaan pada kedalaman 1 – 2 meter didominasi keberadaan batu pasir dengan nilai resistivitas (100 – 300  $\Omega\text{m}$ ), dan struktur bawah permukaan pada kedalaman 0 – 1 meter didominasi oleh keberadaan endapan alluvium dengan nilai resistivitas (86 - 100 $\Omega\text{m}$ ) dan air tanah (45-78,9 $\Omega\text{m}$ ). Data resistivitas yang tinggi mengindikasikan struktur geologi daerah penelitian tidak berhubungan dengan batuan ubahan hidrotermal yang umum terjadi di daerah vulkanik. Sumber panas berasal dari batuan granit yang terkekarkan yang mempunyai kandungan Th (45,3 ppm), U(184,7 ppm), Ti (0,439 %) dan Y(123,1 ppm), sedangkan batuan penudungnya (*clay cap*) adalah lapisan batupasir dan endapan alluvium[22].

Penelitian lain dilakukan oleh Rahmat dan Widodo (2018). Penelitian ini dilakukan di daerah manifestasi mata air panas Desa Nyelanding, Kecamatan Air Gegas, Kabupaten Bangka Selatan, Provinsi Bangka Belitung. Penelitian ini menggunakan survei geofisika dengan metode geolistrik konfigurasi Schlumberger dengan jumlah lintasan sebanyak 3 lintasan geolistrik. Hasil dan kesimpulan pada penelitian tersebut bahwa ditemukan keberadaan granit di sekitar sumber air panas Nyelanding pada lintasan ke- 1 yang berarah timur dari sumber air panas ditunjukkan dengan nilai resistivitas 56,5 - 1046  $\Omega\text{m}$ . Pada lintasan ke-2 berarah utara mata air panas ditunjukkan dengan nilai resistivitas mulai dari 45 - 322  $\Omega\text{m}$  dan nilai resistivitas sekitar 300 - 452  $\Omega\text{m}$ . Lintasan ke-3 menunjukkan kontur anomali granit yang sangat jernih. Data resistivitas tinggi menunjukkan bahwa struktur geologi daerah studi tidak terkait dengan perubahan hidrotermal batuan yang umum di wilayah vulkanik[4].

Penelitian selanjutnya telah dilakukan oleh kelompok penyelidikan panasbumi, Dede Lim Setiawan dan Lano Adhitya (2015). Penelitian ini dilakukan pada

manifestasi mata air panas Permis, Kecamatan Simpang Rimba, Kabupaten Bangka Selatan, Provinsi Bangka Belitung. Penelitian ini menggunakan metode geologi dan geokimia daerah manifestasi mata air panas Permis dan dipatkan hasil bahwa Sistem panas bumi yang terbentuk di Daerah Permis diperkirakan berasosiasi dengan ketersediaan sumber panas (*heat sources*) berupa energi panas hasil aktivitas radioaktif dari unsur-unsur radioaktif penyusun batuan beku granit. Keberadaan aktivitas radioaktif dari unsur-unsur radioaktif yang terkandung dalam batuan granit maupun endapan plaser granit di sekitarnya (*radiogenic*) sebagai sumber panas yang selanjutnya tersapu oleh air meteorik yang melakukan penetrasi jauh ke dalam melalui kontrol struktur sesar sebelum kemudian kembali ke permukaan sebagai mata air panas Permis (*heat sweep*)[23].

## 2.5 Metode Magnetik

### 2.5.1 Gaya Magnetik

Gaya magnetik diakibatkan oleh adanya dua buah kutub yang terpisah dengan jarak  $r$ , dimana dua kutub tersebut memiliki muatan  $P_1$  dan  $P_2$ . Jika kedua kutub tidak sama akan tarik – menarik dan jika sama maka akan tolak – menolak. Dituliskan pada persamaan (1).

$$\vec{F} = \frac{1}{\mu_0} \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (1)$$

dengan  $\mu_0$  adalah permeabilitas medium dalam ruang hampa, tidak berdimensi dan berharga satu,  $\vec{F}$  adalah gaya magnetik (N),  $m_1 m_2$  adalah kutub magnetik,  $\mu_0$  adalah permeabilitas magnetik ( $4\pi \times 10^{-7}$  Weber/Am),  $r$  adalah jarak dalam meter,  $\hat{r}$  adalah vektor satuan [24].

### 2.5.2 Kuat Medan Magnet

Kuat Medan magnet ( $\vec{H}$ ) merupakan besar medan magnet yang timbul pada suatu titik dalam ruang yang diakibatkan oleh jarak diantara 2 kutub. Dituliskan pada persamaan (2). Kuat medan magnet didefinisikan sebagai gaya per satuan kutub

$$\vec{H} = \frac{m}{\mu r^2} \hat{r} \quad (2)$$

dimana  $\vec{H}$  adalah kuat medan magnet (A/m),  $m$  adalah kutub magnet,  $r$  adalah jarak (meter),  $\hat{r}$  adalah vektor satuan [24].

### 2.5.3 Momen Magnetik

Kutub magnet yang berada di alam bersifat dipole atau dua kutub. Suatu dipol magnetik yang dimisalkan sebagai  $+p$  dan  $-p$  dan terpisahkan oleh jarak  $l$ , maka momen dipol magnetik. Dituliskan pada persamaan (3).

$$\vec{m} = lp\hat{r} \quad (3)$$

$\vec{m}$  merupakan sebuah vektor pada vektor unit  $\hat{r}$  berarah dari kutub negatif menuju kutub positif. Satuan momen magnetik dalam SI adalah ampere.meter<sup>2</sup> (A.m<sup>2</sup>), sedangkan dalam cgs satuannya adalah gauss.cm<sup>3</sup> atau emu[25].

Berdasarkan arah momen magnetiknya, material dapat diklasifikasikan sebagai berikut[25]:

a. Diamagnetik

Atom-atom tidak memiliki momen magnetik. Suseptibilitas magnetik bernilai negatif dan rendah.

Contoh: Au, Cu

b. Paramagnetik

Arah momen magnetik dari atom-atomnya adalah acak. Suseptibilitas magnetik bernilai positif dan kecil.

Contoh:  $\beta$ -Sn, Pt, Mn

c. Ferromagnetik

Arah momen magnetik dari atom-atomnya saling sejajar (parallel). Suseptibilitas magnetik bernilai positif dan besar.

Contoh: Fe

d. Antiferromagnetik

Arah momen magnetik dari atom-atomnya terdiri atas campuran parallel dan anti-parallel. Suseptibilitas magnetik bernilai positif dan rendah.

Contoh: Cr

e. Ferrimagnetik

Arah momen magnetik dari atom-atom adalah anti-parallel. Suseptibilitas magnetik bernilai positif dan besar tetapi tidak sebesar ferromagnetik.

Contoh: Ba, ferrite.

#### 2.5.4 Intensitas Magnetik atau Magnetisasi

Magnetisasi merupakan besaran yang menyatakan keteraturan atau kesearahan arah momen-momen magnetik dalam suatu material sebagai akibat dari pengaruh medan magnet luar yang melingkupinya[21]. Magnetisasi  $\vec{M}$  merupakan dipole momen magnetik ( $\vec{m}$ ) per unit volume sehingga memiliki satuan Ampere/meter (A/m) dalam SI.

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{\text{volume}} \quad (4)$$

Suatu material magnetik yang diletakkan pada suatu medan magnet  $H$  maka material tersebut akan termagnetisasi dan momen magnetik atom-atom pada material mengalami penyejajaran arah menghasilkan suatu medan baru yaitu  $M$ . Apabila medan  $H$  rendah, maka dikatakan  $M$  proporsional terhadap  $H$  dalam arah yang sama dan dipengaruhi oleh suseptibilitas magnetik  $k$  [25].

### 2.5.5 Suseptibilitas Magnetik

Suseptibilitas magnetik menyatakan seberapa mampu suatu material untuk dapat termagnetisasi. Faktor yang mempengaruhi nilai suseptibilitas batuan adalah litologi dan kandungan mineralnya. Sehingga besarnya nilai suseptibilitas suatu batuan dituliskan pada persamaan (5)[26].

$$\vec{M} = k \vec{H} \quad (5)$$

dengan  $\vec{H}$  adalah kuat medan magnet dalam A/m,  $\vec{M}$  adalah magnetisasi dalam A/m, dan  $k$  adalah suseptibilitas magnet. **Tabel 2.1** menunjukkan nilai suseptibilitas magnet beragam batuan.

**Tabel 2.1** Suseptibilitas batuan dan mineral (modifikasi dari Telford, et al, 1990)

Jenis	Suseptibilitas x 10 <sup>3</sup> (SI)	
	Kisaran	Rata-rata
Sedimentary		
Dolomite	0-0,9	0,1
Limestone	0-3	0,3
Sandstone	0-20	0,4
Shales	0,01-15	0,6
Av. 48 Sedimentary	0-18	0,9
Metamorphic		
Amphibolite		0,7
Schist	0,3-3	1,4
Phyllite		1,5
Gneiss	0,1-25	
Quartzite		4
Serpentine	3-17	
Slate	0-35	6
Av. 61 Metamorphic	0-70	4,2
Igneous		
Granite	0-50	2,5
Rhyolite	0,2-35	
Dolorite	1-35	17

Augite-Syenite	30-40	
Olivine-Diabase		25
Diabase	1-160	55
Porphyry	0,3-200	60
Gabro	1-90	70
Basalts	0,2-175	70
Diorite	0,6-120	85
Pyroxenite		125

### 2.5.6 Induksi Magnetik

Induksi magnetik dipengaruhi oleh adanya medan luar dan magnetisasi dari material tersebut. Pada batuan induksi magnetik terjadi pada batuan yang memiliki suseptibilitas besanya medan magnet induksi dapat dituliskan pada persamaan (6)[27].

$$B = B_0 + B_m \quad (6)$$

dengan

$$B_m = \mu_0 M \quad (7)$$

serta

$$B_0 = \mu_0 H \quad (8)$$

$B_m$  merupakan medan yang dihasilkan oleh material magnet.  $M$  adalah momen magnet per satuan volume, dan  $\mu_0$  adalah permeabilitas ruang hampa dengan nilai  $4\pi \times 10^{-7}$  Weber/Am dan  $H$  adalah kuat medan dalam A/m.

kemudian mensubstitusikan persamaan (7) dan (8) ke persamaan (9), maka dituliskan sebagai persamaan (9)

$$B = \mu_0(H + M) \quad (9)$$

substitusikan persamaan (6) ke persamaan (9)[26],

$$\mathbf{B} = \mu_0(1+k)\mathbf{H} = \mu_0\mu_r\mathbf{H} = \mu\mathbf{H} \quad (10)$$

dengan  $\mu_r$  adalah permeabilitas relatif ( $=1+k$ ),  $k$  adalah suseptibilitas magnet,  $\mu$  adalah permeabilitas bahan ( $\mu = \mu_0\mu_r$ ), dimana  $\mu_0$  di udara mendekati 1, maka persamaan (10) dituliskan kembali pada persamaan (11)

$$\mathbf{B} = \mu_r\mathbf{H} \quad (11)$$

### 2.5.7 Potensial Magnetostatik, Menghitung Nilai Medan Magnet

Dalam magnetostatika, tidak adanya divergensi dari medan magnetik mengindikasikan keberadaan potensial vektor yang dapat disebut sebagai  $\vec{A}$ . Sehingga persamaan medan magnetik dituliskan pada persamaan (12).

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (12)$$

maka rotasi dari medan magnetik dapat ditulis pada persamaan (13).

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (13)$$

sehingga hukum Ampere dapat dituliskan dalam bentuk persamaan (14)

$$\mu_0 \vec{J} = \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (14)$$

untuk sembarang vektor  $\vec{A}_0$  dan memenuhi  $\vec{\nabla} \times \vec{A} = 0$ , potensial  $\vec{A} + \vec{A}_0$  menghasilkan medan magnetik yang sama dengan potensial  $\vec{A}$  persamaanya dituliskan pada persamaaan (15).

$$\vec{\nabla} (\vec{A} + \vec{A}_0) = \vec{\nabla} \cdot \vec{A} \quad (15)$$

pada magnetostatika rotasi potensial vektor menghasilkan besaran fisis medan magnetik sedangkan divergensi dari vektor potensial tidak berpengaruh terhadap

medan magnetik. Sehingga divergensi dari vektor potensial pada medan magnetik dituliskan pada persamaan (16).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0 \quad (16)$$

sehingga persamaan hukum Ampere pada persamaan (14) tereduksi dan dituliskan pada persamaan (17).

$$\nabla^2 A = -\mu_0 \vec{J} \quad (17)$$

sehingga persamaan (17) merupakan persamaan yang identik dengan persamaan Poisson dengan tiga komponen. Solusinya, jika diasumsikan bahwa  $\vec{J} \rightarrow 0$  pada  $\vec{r} \rightarrow 0$ . Solusi persamaan dituliskan pada persamaan (18).

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{J}(\vec{r}')}{r} d\tau' \quad (18)$$

untuk satu dimensi persamaan (17) dituliskan pada persamaan (19).

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{I}(\vec{r}')}{r} d\vec{l}' \quad (19)$$

sedangkan untuk 2 dimensi persamaan (17) dituliskan pada persamaan (20).

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{K}(\vec{r}')}{r} d\vec{a}' \quad (20)$$

pada pengamatan yang cukup jauh dari sumber yang terlokalisasi, vektor potensial dapat dituliskan sebagai deret pangkat dari  $\frac{1}{r}$ , dengan r adalah jarak sumber dari titik pengamatan. Untuk nilai r yang cukup besar, suku  $\frac{1}{r}$  bisa didekati dengan polinom Legendre dituliskan pada persamaan (21).

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{\sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos \theta'}} = \frac{1}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r'}{r}\right)^n P_n(\cos \theta') \quad (21)$$

sehingga potensial magnetik akibat sumber yang terlokalisasi dapat ditulis dengan persamaan (22).

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{1}{r} d\vec{l} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{r^{n+1}} \oint (r') P_n(\cos \theta') d\vec{l} \quad (22)$$

integral tertutup yang muncul dikarenakan akan mengevaluasi sumber yang terlokalisasi (sebagai contoh loop berbentuk lingkaran) maka persamaanya ditulis pada persamaan (23).

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left\{ \frac{1}{r} \oint d\vec{l} + \frac{1}{r^2} \oint r' \cos \theta' d\vec{l} + \frac{1}{r^3} \oint (r')^2 \left( \frac{3 \cos^2 \theta' - 1}{2} \right) d\vec{l} + \dots \right\} \quad (23)$$

anggap luas dari daerah yang dilingkupi oleh lintasan tertutup  $\oint d\vec{l}$  sebagai  $\vec{a}$ . vektor luas dinyatakan pada persamaan (24).

$$\vec{a} = \frac{1}{2} \oint r' \times d\vec{l} \quad (24)$$

kemudian perkalian  $\vec{a}$  dengan vektor sembarang  $\vec{c}$  menghasilkan ditulis pada persamaan (25).

$$\begin{aligned} \vec{a} \times \vec{c} &= \frac{1}{2} \oint r' \times d\vec{l} \times \vec{c} \\ \vec{a} \times \vec{c} &= \frac{1}{2} \oint d\vec{l} (r' \cdot \vec{c}) \end{aligned} \quad (25)$$

$r' \cdot d\vec{l} = 0$  dikarenakan kedua vektor tersebut saling tegak lurus. Maka untuk  $\vec{c} = \hat{r}$ , diperoleh dituliskan pada persamaan (26).

$$\oint (\hat{r} \cdot r') d\vec{l} = \vec{a} \times \hat{r} = -\hat{r} \int d\vec{a} \quad (26)$$

Jadi, diperoleh potensial dipol magnetik dituliskan pada persamaan (27).

$$\vec{A}_{\text{dipol}}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} \left( -\hat{r} \times \int d\vec{a} \right) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \nabla \times \frac{\vec{m} \times \hat{r}}{r^2} \right) \quad (27)$$

dengan

$$\vec{m} \equiv I \int d\vec{a} = I \vec{a} \quad (28)$$

maka, untuk mendapatkan medan magnet dapat dilakukan dengan cara menentukan rotasi dari vektor potensial dipol magnetik, dituliskan pada persamaan (29)[28].

$$\vec{B}_{\text{dipol}} = \vec{\nabla} \times \vec{A}_{\text{dipol}} \quad (29)$$

### 2.5.8 Anomali Medan Magnet

Sebuah batuan yang memiliki sifat magnet diibaratkan sebagai suatu volume yang memiliki dipole magnet searah dari setiap momen magnet dalam atom- atom penyusunnya. Batu tersebut sering dijumpai memiliki sifat megnetik sejak awal terbentuknya (medan magnet residu/remanen) dan sifat magnetik ini dipengaruhi oleh sejarah magnetisme yang dialaminya. Selain memiliki sifat kemagnetan sendiri, batuan tersebut akan terinduksi oleh medan magnet bumi [26][25]. Medan magnet anomali dihasilkan oleh benda magnetik yang telah terinduksi oleh medan magnet utama bumi, sehingga benda tersebut memiliki medan magnet sendiri dan ikut mempengaruhi besar medan magnet total hasil pengukuran. Variasi medan magnetik yang terukur di permukaan merupakan target dari survey medan magnet anomali[29].

### 2.5.9 Medan Magnetik Bumi

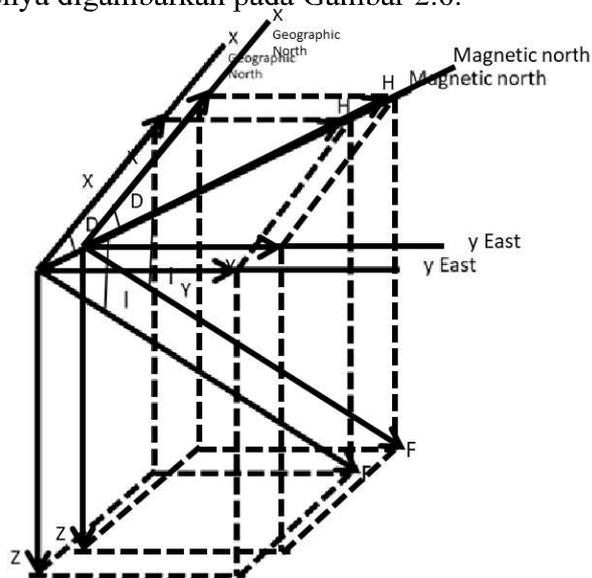
Medan magnet bumi bersumber dari 3 sumber yaitu [26] dan [30] :

- Medan magnet utama
- Medan magnet eksternal
- Variasi medan magnet spasial

Dari ketiga sumber medan magnet tersebut, nilai medan magnet utama bumi adalah yang paling mendominasi besar nilai medannya dan memiliki perubahan nilai dengan siklus yang lama. Dalam kegiatan eksplorasi geofisika menggunakan metode magnetik, ketiga sumber medan magnet ini yang akan menyumbang nilai medan magnet terukur dilapangan.

a. Medan magnet utama

Jika di asumsikan sumber medan magnet magnet tidak ada, dan di bumi hanya dipengaruhi oleh medan magnet utama. Serta jika digantungkan suatu jarum besi digantung pada pusat massanya dan tidak termagnetisasi pada awalnya, maka jarum tersebut akan menunjukkan medan magnet utama bumi. Komponen dari medan magnet bumi dapat diukur dari kondisi jarum tersebut yaitu : He besar medan magnet utama, sudut penunjaman (dip) jarum dengan garis horizontal adalah inklinasi ( $I$ ), sudut antara utara geografis dan arah horizontal jarum adalah deklinasi( $D$ ). Maka medan magnet dan elemennya digambarkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.5 Elemen medan magnetik[26][30]

Besar medan magnet bumi di kutub kutub magnetiknya adalah 60000 nT di kutub utara dan 70000 nT di kutub selatan magnetik bumi. Nilai terendah medan magnetik utama ini adalah ~25000 nT yang terletak di sekitar Utara Brazil-Atlantik Selatan. dari beberapa analisis *spherical harmonic* hampir 99% dari sumber medan magnetnya berasal dari dalam bumi. Teori terbaru menyatakan bahwa sumber medan magnet utama terjadi karena adanya arus konveksi antara material konduktiv dalam inti luar bumi (kedalaman 2800–5000 km) yang mengelilingi inti dalam bumi yang padat dan terdiri dari besi dan nikel.

Sumber magnetik ini diperkirakan seperti sebuah dynamo alami dengan cairan super konduktiv yang bergerak dengan kompleks karena konveksi. Medan magnet bumi berubah terhadap waktu, maka untuk menyeragamkan nilai – nilai medan utama magnet bumi dibuat standart nilai yang disebut sebagai *International Geomagnetics Reference Field* (IGRF). Nilai ini ditentukan berdasarkan kesepakatan *International Association of Geomagnetics and Aeronomy* (IAGA). IGRF diperbarui tiap 5 tahun sekali dan diperoleh hasil pengukuran rata – rata pada daerah luasan 1 juta km<sup>2</sup> yang dilakukan dalam waktu satu tahun.

b. Medan magnet eksternal

Bagian kecil dari medan magnet yang terukur dibumi berasal dari meda magnet eksternal bumi. Nilai medan magnet ini sangat cepat perubahannya dalam waktu. Sumber–sumber medan magnet eksternal ini adalah :

1. Perubahan konduktivitas listrik lapisan atmosphere dengan siklus 11 tahun,
2. Variasi harian dengan periode 24 jam yang berhubungan dengan matahari dengan efek nilai medan magnet ~30 nT.
3. Variasi harian dengan periode 25 jam yag berhubungan dengan bulan dengan efek nilai medan magnet ~ 2 nT
4. Badai magnetik bersifat acak dan efek nilai hingga lebih dari 1000 nT.

Nilai variasi harian tidak memberikan efek signifikan pada pengukuran medan magnet di bumi kecuali jika terjadi badai matahari. Variasi harian dapat dikoreksi dengan menggunakan magnetometer base pada pengukurannya.

c. Variasi medan magnet spasial

Perubahan lokal nilai medan magnet utama bumi karena variasi medan magnet yang dikandung dalam mineral mineral batuan yang terletak di dekat permukaan bumi. Nilai medan magnet ini bisa sangat besar hingga hampir sama dengan medan magnet utama. Medan magnet lokal ini biasanya tidak tersebar dalam jarak yang besar. Sumber dari anomali medan magnet lokal tidak memiliki kedalaman yang sangat dalam di kerak bumi. Hal ini disebabkan oleh sifat magnet yang hilang oleh suhu Curie,

dimana suhu akan semakin meningkat seiring bertambahnya kedalaman dalam bumi[26][30].

### 2.5.10 Koreksi Diurnal

Koreksi diurnal merupakan koreksi dari medan magnet luar yang berasal dari perputaran arus listrik di lapisan ionosfer dan partikel-partikel terionisasi oleh radiasi matahari sehingga menghasilkan fluktuasi arus yang dapat menjadi sumber medan magnet[26]. Koreksi diurnal merupakan penyimpangan intensitas medan magnet bumi yang disebabkan oleh adanya perbedaan waktu pengukuran dan efek sinar matahari dalam satu hari[31]. Secara matematis dituliskan pada persamaan (30).

$$H_D = \frac{(t_n - t_{aw})}{(t_{akh} - t_{aw})} (H_{akh} - H_{aw}) \quad (30)$$

dimana,

$t_n$  = waktu di titik n,  $t_{aw}$  = waktu awal,  $t_{akh}$  = waktu akhir,  $H_{akh}$  = nilai medan magnet dititik akhir,  $H_{aw}$  = nilai medan magnet dititik awal,  $H_D$  = nilai medan magnet terkoreksi harian.

### 2.5.11 Koreksi IGRF

Koreksi IGRF digunakan untuk menghilangkan pengaruh yang berasal dari medan magnet utama bumi. Medan magnet bumi berubah terhadap waktu, untuk menyeragamkannya dibuatlah nilai default yang disebut IGRF(*International Geomagnetics Reference Field*). Koreksi IGRF dapat dilakukan dengan mengurangi nilai IGRF ke total medan magnet yang telah dikoreksi setiap hari pada setiap titik pengukuran pada posisi geografis yang sesuai[32]. Nilai IGRF ini yang akan digunakan dalam pengolahan terhadap koreksi IGRF, dimana nilai koreksi IGRF ini dapat dituliskan pada persamaan (31)[31].

$$H_{\alpha} = H_{\text{rata-rata}} - H_{\text{var}} - H_{\text{IGRF}} \quad (31)$$

dimana  $H_{\alpha}$  = Anomali medan magnetik total,  $H_{\text{rata-rata}}$  = Nilai rata-rata H di tiap stasiun,  $H_{\text{var}}$  = Koreksi variasi harian,  $H_{\text{IGRF}}$  = Koreksi IGRF.

### 2.5.12 Kontinuasi ke Atas

Kontinuasi ke atas merupakan suatu operasi filter yang digunakan untuk menghilangkan pengaruh medan magnet lokal pada data. Proses ini dapat mengurangi anomali magnetik lokal dari objek magnetik yang tersebar di permukaan topografi atau dengan kata lain, Kontinuasi ke atas merupakan proses transformasi data dari bidang potensial ke bidang datar lainnya yang lebih tinggi. Pada pemrosesan data magnetik, proses ini dapat berfungsi sebagai filter untuk menyaring rendah, yaitu untuk menghilangkan efek dari berkurangnya medan magnet lokal yang berasal dari berbagai sumber benda magnetik yang tersebar di permukaan topografi dengan survei. Proses adopsi tidak boleh terlalu tinggi, karena ini dapat mengurangi anomali lokal yang bersumber dari objek magnetik atau struktur geologi yang menjadi target survei magnetik [32]. Secara matematis dituliskan pada persamaan (32).

$$U(x,y,z_0 - \Delta z) = \frac{\Delta z}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U(x',y',z_0)}{((x-x')^2 + (y-y')^2 + \Delta z^2)} dx'dy' \quad (32)$$

Dimana  $U(x,y,z_0 - \Delta z)$  merupakan nilai medan potensial bidang hasil kontinuasi keatas,  $U(x',y',z_0)$  adalah nilai medan potensial bidang observasi sebenarnya, dan  $\Delta z$  merupakan ketinggian ataupun jarak pengangkatan[33].

### 2.5.13 Reduksi ke Kutub

Pada reduksi ke kutub dalam aplikasinya digunakan *Fast Transform Fourier* (FFT) yang secara matematis dituliskan

$$F[\Delta T_r] = F[\psi_r] F[\Delta T] \quad (33)$$

dimana,

$$F[\psi_r] = \frac{1}{\theta_m \theta_f} = \frac{|k|^2}{b_1 k_x^2 + b_2 k_y^2 + b_3 k_x k_y + i |k| (b_1 k_x + b_2 k_y)}, |k| \neq 0$$

$F[\psi_r]$  disebut sebagai reduksi ke kutub, dan  $\Delta T_r$  adalah anomali yang terukur pada kutub utara magnet, dimana induksi magnet dan medan sekitarnya akan mengarah langsung kebawah. Reduksi ke kutub ini menghilangkan salah satu tingkatan kerumitan untuk proses interpretasi, dengan menempatkan anomali diatas sumbernya masing-masing dan mengubah bentuknya. Sehingga sumber menjadi simetris dikarenakan anomali yang simetris[33]. Reduksi ke kutub dilakukan dengan mengubah arah magnetisasi dan medan utama dalam arah *vertical*, memiliki arti bahwa jika daerah penelitian memiliki sudut inklinasi dan deklinasi dengan nilai tertentu maka dengan transformasi ke kutub maka nilai inklinasi dan deklinasi akan menjadi kondisi dikutub dimana nilai dari deklinasi adalah  $0^0$  dan inklinasinya bernilai  $90^0$  dimana itu akan mempermudah dalam interpretasi. Reduksi ke kutub dapat memperlihatkan klosur-klosur lokasi benda penyebab anomali[34].

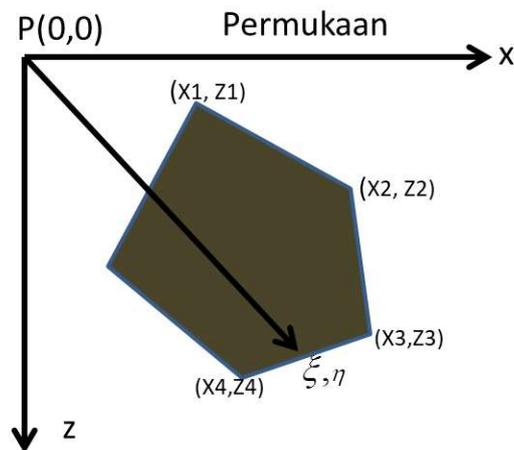
## 2.6 Magnetometer

Magnetometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur medan magnet. Pertama kali dibuat oleh Carl Friedrich Gauss menggunakan magnet batang secara horizontal digantung dari tali emas. Magnetometer memiliki prinsip kerja proton yang ada pada semua atom berputar pada sumbu axis yang sejajar dengan medan magnet Bumi. Setiap proton adalah massa yang berputar dan membawa muatan listrik positif. Putaran muatan partikel ini menghasilkan momen magnetik dan momentum angular pada arah sumbu putarnya. Medan magnet bumi akan menyearahkan momen magnetik proton yang kemudian dilawan oleh momentum angular proton. Sebagai akibatnya, sumbu proton akan berpresisi di sekitar

kerucut yang menunjukkan arah medan magnet bumi. Jumlah putaran sumbu proton di sekitar kerucut dalam waktu tertentu disebut frekuensi presisi proton (f)[25].

## 2.7 Forward Modeling

Pemodelan kedepan 2D (*Forward Modeling 2D*) merupakan metode pembuatan model dengan pendekatan berdasarkan intuisi geologi, medan magnet pengamatan, medan magnet teori (*IGRF-International Geomagnetic Reference field*), medan magnet harian dapat dilakukan interpretasi berupa pemodelan bawah permukaan. Pemodelan kedepan (*forward Modeling*) data magnetik dengan melakukan geometri benda anomali dan harga kemagnetan tertentu. Agar mendapatkan kesesuaian antara data teoritis (*respon model*) dengan data lapangan dapat dilakukan dengan proses coba-coba (*trial and error*) dengan mengubah harga parameter model [35]. Anomali benda 2 dimensi polygon ditentukan menggunakan metode Talwani. Adapun analoginya ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Model 2D benda poligon[36]

besar anomali magnetik 2 dimensi dari benda poligon dirumuskan sebagai berikut.

$$\Delta T(0) = 2M \left[ (\cos^2 i \sin^2 \lambda - \sin^2 i) \frac{\partial^2}{\partial x^2} - 2 \sin i \cos i \sin \lambda \frac{\partial^2}{\partial z \partial x} \right] \iint_s \left[ (X-\xi)^2 + (Z-\eta)^2 \right]^{1/2} d\xi d\eta$$

$$= -2M(1 - \cos^2 \lambda \cos^2 i) \left( \cos 2\beta \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \sin 2\beta \frac{\partial^2}{\partial z \partial x} \right) \iint_s \left[ (X - \xi)^2 + (Z - \eta)^2 \right]^{1/2} d\xi d\eta \quad (34)$$

(Persamaan 11) menunjukkan anomali magnetik bergantung pada geometri benda, suseptibilitas, inklinasi, deklinasi, serta medan magnet bumi. Maka persamaan numerik anomali magnetik total 2 dimensi dirumuskan sebagai berikut[36].

$$\frac{\Delta T(0)}{2M(1 - \cos^2 \lambda \cos^2 i)} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{a_k^2 + 1} (A)(B) - (C)(D) \quad (35)$$

dimana,

$$A = a_k \cos 2\beta + \sin 2\beta$$

$$B = \sqrt{\frac{(1 - a_k^2)z_{k+1}^2 + 2a_k b_k z_{k+1} + b_k^2}{(1 - a_k^2)z_{k+1}^2 + 2a_k b_k z_{k+1} + b_k^2}}$$

$$C = a_k \sin 2\beta - \cos 2\beta$$

$$D = \tan^{-1} \left[ \frac{(1 + a_k^2)z_{k+1}^2 + a_k}{b_k} \right] - \tan^{-1} \left[ \frac{(1 + a_k^2)z_{k+1}^2 + a_k}{b_k} \right]$$

## 2.8 Temperatur Curie

Temperatur Curie merupakan suhu kritis ketika suatu bahan padat mengalami transisi dari fase Feromagnetik menjadi fase paramagnetik akibat pemanasan. Bahan feromagnetik ketika dipanaskan diatas temperatur Curie, spinnya akan berorientasi secara acak membawa material pada fase paramagnetik[37]. Pada penelitian panasbumi, penggunaan metode magnetik didasari oleh sifat kemagnetan batuan dimana batuan yang mengalami kenaikan temperatur Curie maka batuan tersebut mengalami demagnetisasi (kehilangan kemagnetan)[38].