

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Pulau Sulawesi memiliki potensi energi panas bumi yang signifikan sebagai akibat dari aktivitas geologi seperti vulkanisme dan tektonik (Jamaluddin & Umar, 2017). Aktivitas ini memicu terbentuknya sistem panas bumi, terutama di wilayah-wilayah dengan manifestasi permukaan seperti mata air panas, endapan silika, dan alterasi mineral. Salah satu wilayah yang menunjukkan indikasi kuat adanya manifestasi panas bumi adalah daerah Lemo Susu, Kabupaten Pinrang, yang secara geologi termasuk dalam zona yang aktif dan kompleks. Aktivitas geologi yang terjadi di wilayah ini menghasilkan batuan dengan karakteristik khas yang diduga mengandung mineral alterasi, yang terbentuk akibat interaksi antara fluida hidrotermal dan batuan induk. Keberadaan mineral-mineral alterasi tersebut tidak hanya menjadi penanda proses geotermal yang sedang atau pernah berlangsung, tetapi juga dapat dimanfaatkan untuk menilai potensi sumber daya panas bumi. Oleh karena itu, penting untuk melakukan kajian terhadap kandungan mineral batuan di wilayah tersebut guna memahami lebih jauh proses geologi yang terjadi, memetakan distribusi mineral, serta mengevaluasi potensi energi dan sumber daya yang terkandung di dalamnya.

Identifikasi mineral dalam batuan dapat dilakukan dengan berbagai metode, baik secara makroskopis maupun mikroskopis. Salah satu metode yang saat ini banyak digunakan adalah *Fourier Transform Infrared* (FTIR), sebuah teknik spektroskopi yang mampu mendeteksi gugus fungsi dalam senyawa organik maupun anorganik melalui serapan radiasi inframerah, dan dilakukan tanpa merusak sampel (Sari et al., 2018). Gugus fungsi yang terdeteksi dapat menunjukkan adanya mineral-mineral tertentu, seperti kaolinit, montmorillonit, silika amorf, dan lain-lain, yang umumnya terbentuk melalui proses alterasi hidrotermal. Selain itu, *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang dilengkapi dengan *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) merupakan metode yang sangat efektif untuk menganalisis morfologi permukaan batuan secara detail serta mendapatkan komposisi unsur secara kuantitatif pada skala mikro hingga nanometer. Dengan keunggulannya dalam memberikan gambaran visual resolusi tinggi dan spektrum unsur, metode ini dapat membantu mengidentifikasi fase mineral penyusun batuan dengan cepat dan akurat. Kedua metode ini tidak hanya saling melengkapi tetapi juga memberikan informasi yang lebih komprehensif mengenai karakteristik mineral dan unsur yang terdapat dalam sampel batuan.

Metode *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dan *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectroscopy* (SEM-EDS) telah terbukti efektif dan banyak digunakan dalam penelitian sebelumnya. Seperti pada penelitian Hulungo et al. (2022) berhasil menggunakan FTIR untuk mengidentifikasi kandungan mineral batuan di daerah panas bumi Mototompiaan, Sulawesi Utara, dan memperoleh data

gugus fungsi yang menunjukkan keterdapatan mineral alterasi seperti kaolinit dan kalsit. Penelitian ini memberikan gambaran bagaimana interpretasi gugus fungsi dapat berkorelasi dengan kondisi geotermal di lapangan. Sementara itu, Julinawati et al. (2015) menggunakan SEM-EDS dalam analisis batu Giok Takengon di Aceh dan mampu menunjukkan morfologi mineral serta sebaran unsur seperti Si, Al, Fe, dan Mg dalam batuan secara detail. Penggunaan kedua metode ini dalam penelitian terdahulu yang membuktikan kehandalan dan efektivitasnya dalam analisis mineralogi batuan, baik itu dalam konteks geologi, material, dan juga industri.

Namun demikian, hingga saat ini belum ditemukan adanya penelitian yang secara khusus menerapkan kombinasi metode SEM-EDS dan FTIR untuk menganalisis kandungan mineral batuan di daerah manifestasi panas bumi Lemo Susu, Kabupaten Pinrang. Dengan demikian, penelitian ini memiliki unsur kebaruan dari segi lokasi penelitian dan pendekatan analisis yang digunakan. Penelitian ini diharapkan dapat mengisi kekosongan data geologi mikro pada kawasan tersebut serta memperkaya referensi ilmiah mengenai karakteristik batuan alterasi di wilayah panas bumi di Sulawesi Selatan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kandungan mineral batuan berdasarkan distribusi gugus fungsinya melalui metode FTIR, serta mengetahui unsur dan senyawa penyusunnya menggunakan metode SEM-EDS. Pemahaman terhadap kedua aspek ini akan memperjelas karakteristik geokimia batuan dan mendukung interpretasi proses geotermal yang terjadi di daerah penelitian.

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat nyata, tidak hanya sebagai bahan kajian akademik, tetapi juga sebagai informasi dasar yang dapat digunakan oleh masyarakat, peneliti, maupun pihak industri dalam pengelolaan dan pemanfaatan sumber daya mineral di daerah panas bumi tersebut. Data yang dihasilkan juga dapat mendukung upaya eksplorasi energi panas bumi yang berkelanjutan, serta berkontribusi pada pembangunan energi terbarukan di wilayah Sulawesi Selatan khususnya di Kabupaten Pinrang.

## **1.2 Tujuan dan Manfaat**

### **1.2.1 Tujuan**

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengidentifikasi jenis mineral batuan di area panas bumi Lemo Susu menggunakan metode SEM-EDS dan FTIR.
2. Menentukan tingkat alterasi batuan berdasarkan hasil analisis komposisi kimia (SEM-EDS) dan gugus fungsi mineral (FTIR).
3. Membandingkan karakteristik mineral antar sampel untuk mengetahui pengaruh aktivitas hidrotermal di lokasi penelitian

### **1.2.1 Manfaat**

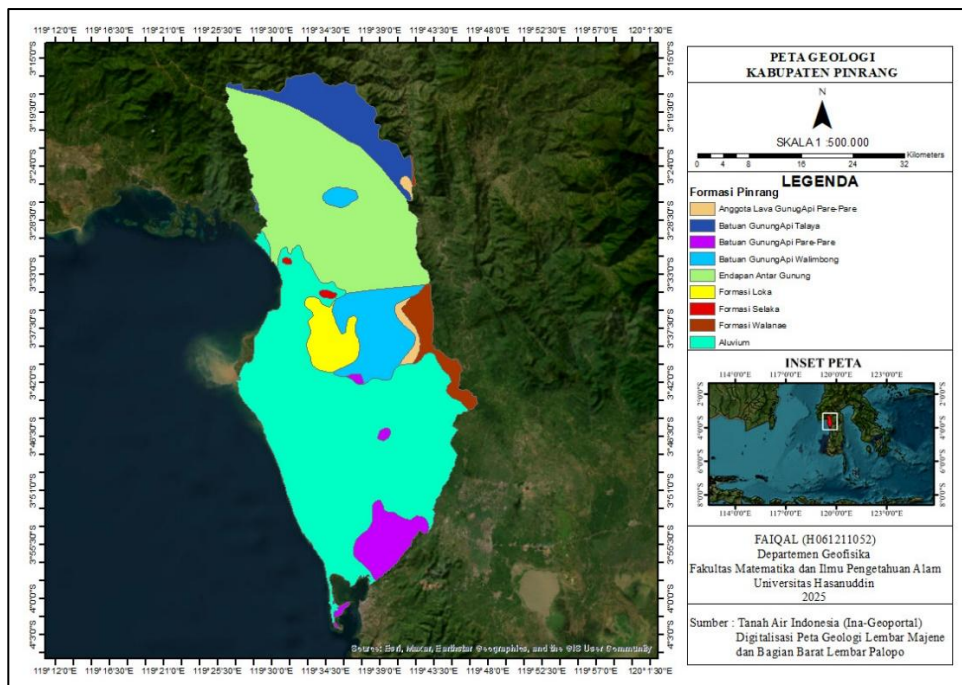
Penelitian ini bermanfaat untuk menambah pengetahuan mengenai karakteristik mineral dan senyawa penyusun batuan teralterasi di daerah manifestasi panas bumi Lemo Susu, Kabupaten Pinrang. Melalui pemanfaatan metode SEM-EDS dan FTIR,

penelitian ini memberikan informasi mengenai komposisi unsur, oksida, serta gugus fungsi mineral yang terbentuk akibat proses alterasi hidrotermal.

Secara praktis, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai data pendukung awal dalam kajian potensi panas bumi di wilayah tersebut, khususnya dalam identifikasi jenis mineral alterasi dan tingkat alterasi batuan. Informasi mineralogi yang diperoleh dapat menjadi indikator kualitatif terhadap pengaruh aktivitas hidrotermal di lokasi penelitian. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah dan bahan edukasi bagi mahasiswa, peneliti, serta masyarakat sekitar dalam memahami potensi geologi daerahnya, serta mendorong pemanfaatan sumber daya alam secara bijak dan berkelanjutan.

### 1.3 Landasan Teori

#### 1.3.1 Geologi Regional



**Gambar 1.** Peta Geologi Kabupaten Pinrang

Penelitian ini dilakukan di Pemandian Lemosusu, yang berada di Desa Betteng, Kecamatan Lembang, Kabupaten Pinrang, Sulawesi Selatan. Berdasarkan hasil interpretasi peta geologi yang telah didigitasi dari Peta Geologi Lembar Majene dan Bagian Barat Lembar Palopo, daerah ini menunjukkan keragaman satuan batuan yang cukup kompleks. Penyebaran batuan di wilayah ini mencakup satuan batuan gunungapi, sedimen, hingga endapan permukaan muda, yang mencerminkan sejarah geologi yang panjang dan dinamis.

Salah satu batuan yang domain di wilayah ini adalah Formasi Loka, yang tersebar luas hingga di bagian selatan dan barat daya Kabupaten Pinrang. Formasi ini tersusun oleh breksi vulkanik, konglomerat, batupasir, dan batulanau, yang diendapkan dalam lingkungan transisi dari darat hingga laut dangkal. Formasi Loka diperkirakan berumur Miosen Tengah hingga Miosen Akhir, dan terbentuk dari material hasil letusan gunungapi yang terendapkan secara berlapis (Sukamto, 1975).

Di bagian tengah dan timur laut wilayah penelitian, tersingkap Formasi Selaka, yang merupakan satuan batuan sedimen laut dalam hingga menengah. Formasi ini didominasi oleh serpih, batupasir halus, dan batulempung, serta terbentuk dalam rentang waktu dari Miosen Tengah hingga Pliosen. Karakteristik litologinya yang lebih halus dan homogen mencerminkan lingkungan pengendapan yang lebih tenang dibandingkan Formasi Loka. Selain itu, di wilayah timur laut juga ditemukan Formasi Walanae, yang merupakan satuan sedimen berumur Plio-Pleistosen. Formasi ini terdiri dari batupasir, batulempung, dan konglomerat, dan memiliki keterkaitan erat dengan sistem sesar besar di Sulawesi Selatan, khususnya Sesar Walanae. Struktur ini diduga menjadi jalur utama migrasi fluida panas bumi dan kemunculan mata air panas di beberapa lokasi (Umar et al., 2019).

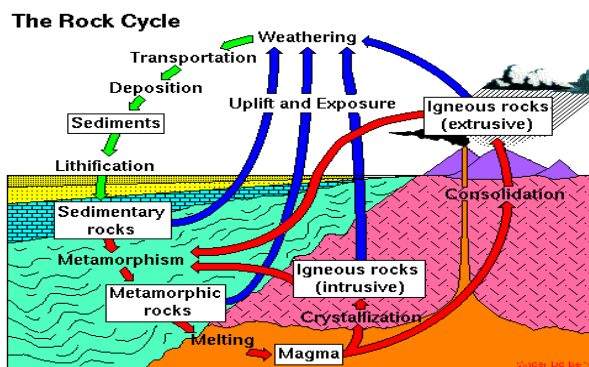
Kompleksitas geologi wilayah ini semakin ditunjukkan oleh kehadiran sejumlah satuan batuan gunungapi, seperti Batuan Gunungapi Pare-Pare, Batuan Gunungapi Walimbong, Gunungapi Talaya, serta Anggota Lava Gunungapi Pare-Pare. Satuan-satuan ini mencakup batuan lava, tufa, dan breksi vulkanik yang terbentuk dari aktivitas vulkanik antara Miosen Akhir hingga Kuarter. Sebaran batuan ini dominan di bagian tengah dan utara Kabupaten Pinrang, serta sering kali berasosiasi dengan rekahan atau sesar aktif (Sukamto, 1975).

Satuan lain yang juga penting adalah Endapan Antar Gunung, yang merupakan hasil pelapukan dan erosi dari batuan vulkanik di antara dua episode aktivitas gunungapi. Satuan ini biasanya tersusun oleh tufa halus, batupasir tufaan, dan batu lempung. Adapun endapan aluvial tersebar luas di lembah sungai dan dataran rendah, dan terdiri atas kerikil, pasir, lanau, serta lumpur, yang merupakan satuan geologi termuda dan paling aktif secara geomorfologis.

Dari aspek struktur geologi, wilayah Kabupaten Pinrang dipengaruhi oleh sistem sesar berarah barat laut-tenggara. Jalur sesar ini berperan penting dalam pengaturan distribusi satuan batuan dan juga menjadi jalur potensial keluarnya fluida hidrotermal ke permukaan. Titik sampel pada peta menunjukkan bahwa lokasi penelitian berada di zona yang tersusun oleh Formasi Loka, dan berada dekat dengan jalur sesar serta batuan vulkanik muda. Kondisi ini sangat mendukung keberadaan sistem hidrotermal dangkal yang menjadi objek utama dalam penelitian ini (Umar et al., 2019).

### 1.3.2 Batuan

Batuan adalah material padat, keras, dan taha lama yang memiliki karakteristik bervariasi sesuai dengan kondisi dan proses pembentukannya. Batuan tersusun dari berbagai mineral, yang dapat dikelompokkan berdasarkan unsur penyusunnya. Mineral yang hanya terdiri dari satu unsur dikenal sebagai unsur asli (Pambudi et al., 2018). Dalam konteks geologi, batuan merujuk pada massa padat yang membentuk kerak bumi, baik yang terdiri dari satu mineral atau lebih, dengan tekstur yang kompak dan tingkat kekerasan bervariasi dari keras hingga sedang. Jumlah batuan di bumi bersifat lestari karena adanya siklus batuan. Siklus batuan ini menggambarkan serangkaian perubahan, dimulai dari magma yang mendingin dan membeku membentuk batuan beku, kemudian mengalami proses menjadi sedimen, batuan sedimen, dan batuan metamorf, hingga akhirnya kembali menjadi magma (Nauli et al., 2018).



**Gambar 2.** Siklus Batuan (Nauli et al., 2018).

Berdasarkan **Gambar 2**, mekanisme siklus batuan melibatkan proses pendinginan magma yang menghasilkan kristalisasi batuan beku. Jika batuan ini terdorong jauh ke bawah permukaan bumi, ia dapat meleleh kembali menjadi magma. Selanjutnya, batuan beku mengalami pelapukan, erosi, transportasi (baik dalam bentuk larutan maupun tidak), dan pengendapan, yang kemudian membentuk batuan sedimen. Ada pula kemungkinan batuan mengalami perubahan langsung menjadi batuan metamorf selama siklus. Pada tahap ini, batuan sedimen juga dapat bermetamorfosis melalui kontak, dinamik, atau hidrotermal, berubah menjadi batuan metamorf. Siklus berlanjut ketika batuan metamorf mencapai lapisan bumi dengan suhu tinggi, yang menyebabkan kembali meleleh menjadi magma melalui proses magmatisasi. Setelah melalui siklus ini, batuan akan bertransformasi dari magma menjadi batuan beku, batuan metamorf, dan batuan sedimen, sebelum akhirnya menjadi magma jika terdorong ke dalam bumi dan meleleh (Blaak & Tracy, 1996).

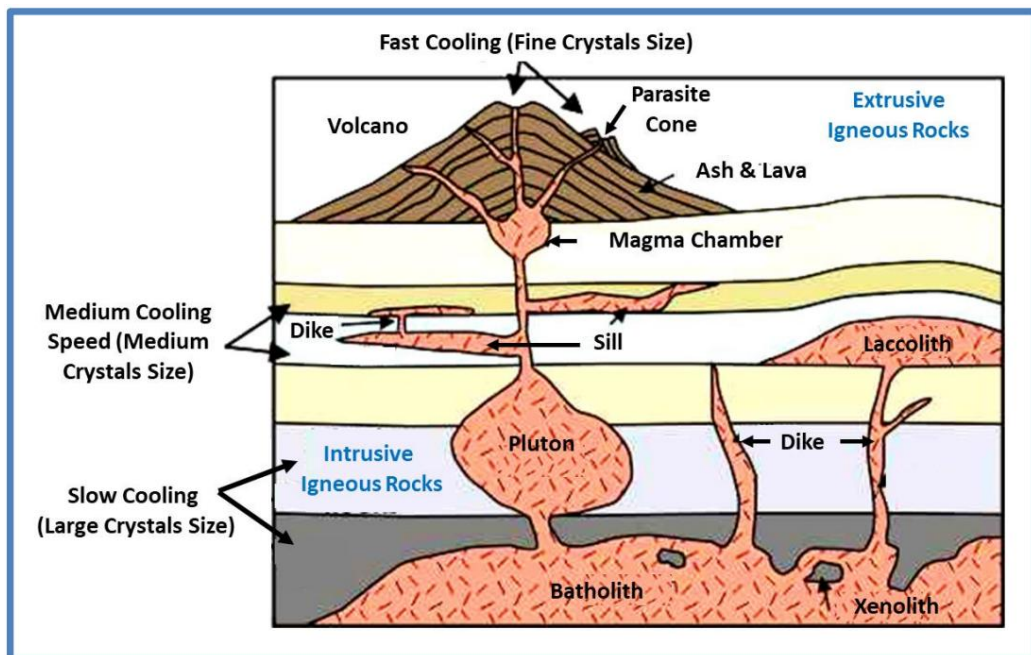
### 1.3.3 Batuan Beku

Batuan beku terbentuk ketika magma membeku dan mendingin, baik dengan atau tanpa kristalisasi. Proses pembentukan ini bisa terjadi di atas permukaan bumi, menghasilkan batuan ekstrusif (vulkanik), atau di bawah permukaan, membentuk

batuan intrusif (plutonik). Magma yang menjadi asal batuan beku dapat berasal dari batuan yang sudah ada atau batuan setengah cair di mantel maupun kerak bumi. Pelelehan batuan umumnya disebabkan oleh peningkatan suhu, penurunan tekanan, atau perubahan komposisi. Hingga saat ini, lebih dari 700 jenis batuan beku telah teridentifikasi, dengan sebagian besar terbentuk di kedalaman kerak bumi (Massinai et al., 2022).

Menurut Sultoni et al. (2019), terdapat dua jenis utama pembentukan batuan beku:

1. Batuan Beku Ekstrusif (Luar): Terbentuk ketika magma mendingin dengan cepat di permukaan bumi, menghasilkan batuan dengan tekstur kristal yang sangat halus.
2. Batuan Beku Intrusif (Dalam): Terbentuk saat magma membeku secara perlahan di bawah permukaan bumi, bahkan hingga jutaan tahun, yang menyebabkan batuan memiliki kristal berukuran besar.



**Gambar 3.** Saluran Magma (Dahaan, 2019)

Magma yang naik ke permukaan bumi bisa menyebabkan letusan gunung berapi. Namun, sebagian besar magma justru mendingin dan membeku di dalam kerak bumi, mengisi celah atau salurannya. Magma mengandung unsur-unsur utama yang akan mengkristal dan membeku berbagai mineral saat mendingin. Salah satu contohnya adalah mineral besi, yang terbentuk karena kandungan unsur Fe dalam magma saat melewati berbagai saluran di dalam bumi. Menurut Dahaan (2019), saluran atau ruang magma ini dibagi menjadi beberapa jenis:

- a. Pluton, massa batuan yang terbentuk di mante bumi dengan berbagai bentuk dan tidak terhubung dengan batuan di sekitarnya;
- b. Batolith, massa batuan yang sering terlihat di permukaan bumi dengan luas lebih dari 100 km<sup>2</sup>;
- c. Sill, bentuk batuan tabular yang terbentuk sejajar dengan lapisan bumi;
- d. Dyke, bentuk batuan yang melintang sejajar dengan perlapisan batuan;
- e. Laccolith, bentuk intrusi yang mendorong lapisan batuan di atasnya hingga membentuk kubah;
- f. Pipa, saluran magma berbentuk silinder (bisa melingkar, elips, atau tidak beraturan) yang menghubungkan ruang magma satu ke ruang magma lain, atau ke saluran gunung berapi;
- g. Xenolith, Batuan asing yang ditemukan di dalam batuan beku, yang tidak terbentuk bersamaan dengan batuan beku tersebut;
- h. Ruang Magma, tempat magma terkumpul di bawah lapisan bumi.

Batuan yang bergerak jauh ke bawah permukaan bumi bisa meleleh lagi jadi magma karena suhu tinggi. Kalau magma ini berhenti bergerak ke permukaan, ia akan mendingin. Pendinginan batuan di dalam bumi ini berlangsung sangat lambat, sehingga menghasilkan batuan dengan tekstur kasar, contohnya granit. Sebaliknya, magma yang keluar ke permukaan bumi (kita sebut lava) akan mendingin sangat cepat karena langsung terkena udara. Proses pendinginan yang cepat ini membuat batuan punya tekstur halus atau bahkan kaca alami, seperti pada batuan basal (Earle, 2015).

Komposisi magma bervariasi tergantung pada proses pembentukannya, yang memengaruhi jenis mineral yang terkandung di dalamnya. Namun, secara umum, magma didominasi oleh beberapa unsur utama: oksigen, silikon, aluminium, besi, kalsium, natrium, magnesium, dan kalium. Oksigen adalah unsur yang paling melimpah, menyumbang hampir setengah dari total kandungan unsur dalam batuan beku. Selanjutnya, silikon menyusun lebih dari seperempat komposisi magma. Unsur-unsur lainnya membentuk presentase sisanya dalam batuan.

Proporsi elemen dalam setiap magma bervariasi. Magma yang berasal dari kerak bumi umumnya kaya akan oksigen, silikon, aluminium, natrium, dan kalium. Komposisi magma ditentukan oleh lokasi pembentukannya atau kondisi saat batuan mencair. Sementara itu, magma yang berasal dari mantel bumi cenderung memiliki kadar zat besi, magnesium, dan kalium yang lebih tinggi, meskipun oksigen dan silikon tetap menjadi unsur dominan.

Hampir semua batuan beku yang kita temukan di Bumi terbentuk dari magma, yang merupakan hasil pencairan sebagian batuan yang ada, baik di mantel atas maupun di kerak bumi. Pencairan ini sering kali hanya terjadi secara parsial karena batuan bukanlah material murni. Kebanyakan batuan tersusun dari beberapa mineral yang memiliki titik leleh yang berbeda-beda (Prinz et al., 1988).

### 1.3.4 Mineral

Mineral adalah zat murni alami yang memiliki kombinasi unsur-unsur spesifik dan struktur kristal atau sifat yang unik sesuai dengan unsur pembentuknya. Berbeda dengan mineral, batuan umumnya merupakan campuran dari beberapa mineral yang berbeda (Sultoni et al., 2019). Mineral dapat didefinisikan sebagai benda homogen dengan susunan atom yang sangat teratur dalam struktur atom, hasil dari proses kristalisasi. Sebagai bagian dari integral dari kerak bumi, mineral memiliki komposisi kimia yang stabil dan dapat dinyatakan dengan rumus kimia. Sifat fisik mineral juga stabil pada kondisi suhu dan tekanan tertentu. Endapan mineral, baik logam maupun non-logam, dapat terbentuk melalui proses mineralisasi yang diakibatkan oleh aktivitas magma. Perlu diketahui bahwa mineral penyusun magma tidak terbentuk secara simultan atau dalam kondisi yang sama. Beberapa mineral tertentu akan mengkristal pada suhu yang lebih tinggi dibandingkan mineral lainnya. Pembentukan beragam mineral di alam ini menghasilkan berbagai jenis batuan yang memiliki komposisi kimia dan sifat fisik tertentu (Pambudi, 2018).

### 1.3.5 Alterasi Hidrotermal

Alterasi hidrotermal adalah perubahan komposisi mineral dalam suatu batuan yang disebabkan oleh interaksi antara larutan hidrotermal dan batuan tersebut. Proses ini mengubah mineral primer menjadi mineral sekunder, yang dikenal sebagai mineral teralterasi. Alterasi hidrotermal merupakan proses yang kompleks, mencakup perubahan mineralogi, kimia, dan tekstur akibat interaksi fluida hidrotermal dengan batuan sampling (*wall rock*) dalam kondisi fisika-kimia tertentu (Pirajno, 2009).

Sistem panas bumi dalam satu wilayah tidak selalu memiliki karakter yang seragam, karena sangat dipengaruhi oleh kondisi litologi dan struktur geologi setempat. Perbedaan porositas batuan, keberadaan rekahan, serta jalur struktur seperti sesar dapat mengontrol pergerakan fluida hidrotermal dan intensitas interaksi fluida–batuan. Kondisi tersebut menyebabkan proses alterasi hidrotermal dapat berkembang dengan tingkat yang berbeda, meskipun masih berada dalam satu sistem panas bumi yang sama. Oleh karena itu, identifikasi mineral alterasi menjadi salah satu pendekatan penting dalam studi panas bumi (Massinai et al., 2026).

Nicholson (1993) mengidentifikasi tiga bentuk kehadiran alterasi dalam sistem panas bumi:

1. **Alterasi berupa pergantian mineral** terjadi ketika mineral primer berubah menjadi mineral sekunder yang lebih stabil pada kondisi spesifik dalam lingkungan sistem panas bumi. Stabilitas mineral ini sangat dipengaruhi oleh sifat fisik batuan reservoir, terutama permeabilitas, karena permeabilitas yang tinggi memungkinkan fluida hidrotermal berinteraksi lebih intens, menghasilkan alterasi yang lebih kuat, dan sebaliknya;
2. **Alterasi berupa pengendapan mineral** sering ditemukan di daerah dengan sistem panas bumi. Pengendapan ini terjadi pada jalur atau ruang seperti kekar,



sesar, ketidakselarasan, lubang, pori, atau rekahan yang dapat diisi oleh mineral hidrotermal. Proses pengendapan terjadi saat fluida hidrotermal yang membawa mineral terlarut melewati jalur tersebut, mengalami penurunan suhu, mengurangi kelarutan fluida, dan mengendapkan mineral seperti kuarsa atau kalsit;

3. **Pencucian** adalah proses pelarutan batuan atau mineral oleh fluida hidrotermal yang umumnya bersifat asam, seperti  $H_2S$ . Dalam sistem panas bumi, pembentukan fluida asam yang mencuci batuan berasal dari kondensasi fase uap fluida hidrotermal, yang kemudian bercampur dengan air meteorik dan mengalami oksidasi menghasilkan sulfat. Batuan yang mengalami pencucian sering menunjukkan rongga, terutama di bagian fenokris batuan yang menghilang akibat proses ini.

Beberapa faktor yang memengaruhi proses alterasi hidrotermal meliputi suhu, kimia fluida (pH), komposisi batuan sampling, durasi aktivitas hidrotermal, dan permeabilitas. Namun, kimia fluida (pH) dan suhu dianggap sebagai faktor yang paling berpengaruh. Suhu sangat penting dalam proses alterasi karena hampir semua reaksi kimia yang dipicu oleh kenaikan suhu. Permeabilitas batuan menentukan intensitas pengaruh larutan hidrotermal dan kecepatan pengendapan mineral-mineral baru. Batuan dengan permeabilitas rendah akan menghasilkan tingkat alterasi yang tidak signifikan. Komposisi kimia awal batuan yang berinteraksi dengan larutan hidrotermal akan menentukan jenis komponen yang terbentuk akibat alterasi. pH dan komposisi fluida sangat memengaruhi kecepatan dan jenis mineral hidrotermal yang terbentuk (Corbett & Leach, 2007). Proses alterasi hidrotermal menghasilkan kumpulan mineral tertentu yang dikenal dengan sebagai himpunan mineral atau mineral *assemblage* (Guilbert & Park, 1986).

Corbett & Leach (2007) mengklasifikasikan tipe alterasi hidrotermal berdasarkan kelompok mineral alterasinya. Pengelompokan mineral alterasi ini disesuaikan dengan peningkatan pH dan temperatur fluida hidrotermal yang mengubah batuan sampling:

- a. Kelompok Mineral Silika

Mineral-mineral Silika merupakan mineral-mineral alterasi yang stabil untuk hadir dalam kondisi pH fluida yang sangat rendah. Silika opal, Kristobalit, dan Tridimit merupakan mineral-mineral silika yang terbentuk pada suhu yang rendah ( $<100^{\circ}C$ ), sedangkan Kuarsa merupakan mineral silika yang terbentuk pada temperatur tinggi.

- b. Kelompok Mineral Alunit

Alunit terbentuk pada pH yang rendah ( $\pm 2$ ) dan bersamaan dengan mineral-mineral Silika dengan kisaran suhu yang panjang. Alunit dapat terbentuk di beberapa kondisi, antara lain: steam-heated, supergen, magmatik, dan urat/breksi magmatik.

- c. Kelompok Mineral Kaolin

Kelompok mineral Kaolin terbentuk pada pH fluida yang rendah (3 – 4). Kelompok mineral ini terdiri dari Kaolinit, Pirofilit, Dickite, dan Diasphore. Kaolinit terbentuk pada kedalaman yang dangkal dan suhu rendah (150° - 200°C), Pirofilit terbentuk pada kedalaman yang lebih dalam dari Kaolinit dan suhu yang lebih tinggi (<200° - 250°C), Dickite terbentuk pada kedalaman dan suhu diantara keduanya (Kaolinit dan Pirofilit), dan Diasphore terbentuk secara lokal bersamaan dengan kelompok alunit dan/atau kaolin pada zona silifikasi.

d. Kelompok Mineral Illit

Kelompok mineral ini terbentuk secara dominan pada pH fluida sekitar 4 – 6, dan dapat hadir bersamaan dengan kelompok mineral Kaolin, tergantung dari temperatur dan salinitas fluida. Kelompok mineral ini terdiri dari Smektit yang terbentuk pada suhu <100° – 150°C, perselingan Illit – Smektit pada 100° – 200°C, Illit pada kisaran 200° – 250°C, dan Muskovit pada >250°C.

e. Kelompok Mineral Klorit

Mineral-mineral Klorit-Karbonat terbentuk pada kondisi pH mendekati netral, dan dapat bersamaan dengan kelompok Illit pada kondisi pH fluida berkisar 5 – 6. Perselingan Klorit-Smektit hadir pada saat kondisi temperatur rendah, berangsur menjadi Klorit saat temperatur tinggi.

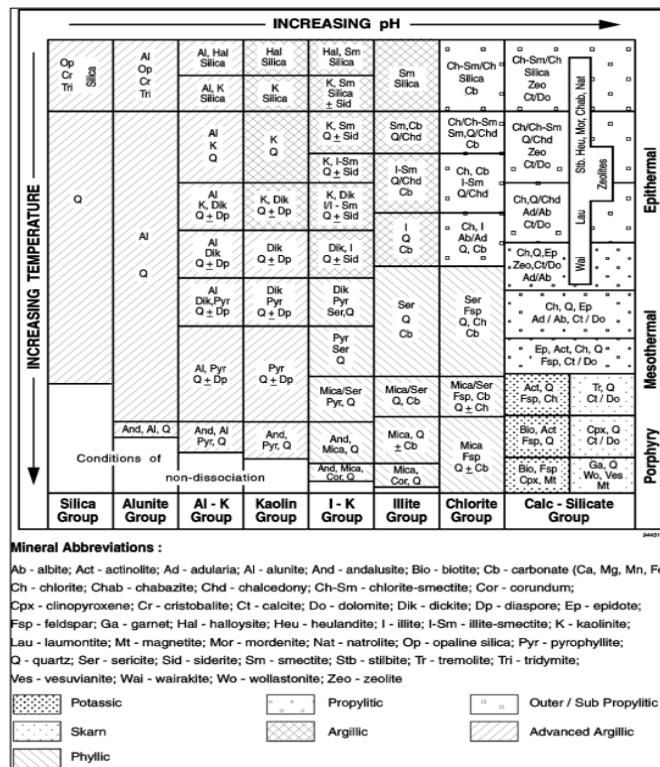
f. Kelompok Mineral Kalk-Silikat

Kelompok mineral ini terbentuk pada kondisi pH yang netral hingga basa. Zeolit-Klorit-Karbonat terbentuk pada kondisi yang dingin, sedangkan Epidot, dan Amfibol sekunder (Aktinolit) terbentuk pada suhu yang lebih tinggi.

g. Mineral-mineral lain

Mineral-mineral lain yang terbentuk pada alterasi hidrotermal, antara lain:

- Karbonat, terbentuk pada kisaran pH dan temperatur yang panjang, berasosiasi dengan Kaolin, Illit, Klorit, dan mineral Kalk-Silikat.
- Feldspar, berasosiasi dengan klorit dan mineral Kalk-Silikat. Feldspar sekunder umumnya stabil pada kondisi pH netral hingga basa. Feldspar sekunder yang umumnya hadir berupa Adularia (suhu rendah) dan Ortoklas (suhu tinggi).
- Sulfat, hadir pada di seluruh kondisi pH dan suhu pada sistem hidrotermal. Mineral-mineral sulfat yang hadir berupa Alunit (pH 3 – 4), Anhidrit (pH lebih tinggi, temperatur >100°C – 150°C), dan Gypsum (Kondisi lingkungan lebih dingin). Jarosit terbentuk oleh pelapukan sulfida.



**Gambar 4.** Kelompok mineral alterasi hidrotermal berdasarkan kondisi pH dan temperatur fluida (Corbett & Leach, 1997)

### 1.3.6 Sifat Kimiawi Batuan

Menurut Massinai et al. (2022), ada empat kelompok mineral utama yang membentuk batuan, antara lain:

#### 1. Mineral Silikat

Mineral silikat adalah penyusun utama hampir 90% batuan di bumi, termasuk batuan beku, sedimen, dan metamorf. Mereka terbentuk dari senyawa silikon dan oksigen, seringkali dengan tambahan unsur logam. Karena jumlahnya yang melimpah, mineral silikat membentuk sekitar 90% berat kerak bumi dan hampir seluruh mantel bumi (hingga kedalaman 2.900 km).

#### 2. Mineral Oksida

Mineral oksida terbentuk ketika oksigen bereaksi langsung dengan unsur tertentu. Struktur mereka lebih sederhana dibandingkan silikat. Umumnya, mineral oksida lebih keras dan lebih berat daripada mineral lain, kecuali silikat (untuk kekerasan) dan sulfida (untuk berat). Contoh umum mineral oksida adalah es ( $H_2O$ ), korundum ( $Al_2O_3$ ), hematit ( $Fe_2O_3$ ), dan kasiterit ( $SnO_2$ ).

#### 3. Mineral Sulfida

Mineral sulfida terbentuk dari reaksi langsung antara belerang (sulfur) dan unsur-unsur tertentu seperti besi, perak, tembaga, timbal, seng, dan merkuri. Beberapa

mineral sulfida ini memiliki nilai ekonomis sebagai bijih, contohnya pirit ( $\text{FeS}_2$ ), kalkosit ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), dan spalerit ( $\text{ZnS}$ ).

#### 4. Mineral Karbonat dan Sulfat

Mineral ini merupakan persenyawaan dengan ion  $(\text{CO}_3)^{2-}$ , yang disebut karbonat, umpamanya persenyawaan dengan Ca dinamakan kalsium karbonat,  $\text{CaCO}_3$  dikenal sebagai mineral kalsit. Mineral ini merupakan susunan utama yang membentuk batuan sedimen.

### 1.3.7 Metode SEM-EDS

Metode *Scanning Electrone Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive X-Ray Spectrometry* (EDS) merupakan teknik penelitian yang mampu mengidentifikasi jenis-jenis mineral dalam batuan. Ini dilakukan dengan menganalisis kandungan unsur maupun oksidanya, sehingga kita juga bisa memahami sifat fisik dan kimia mineral tersebut. Identifikasi menggunakan SEM-EDS menawarkan hasil yang cepat dan akurat karena metodena yang sederhana dan waktu penelitian yang singkat. Dalam proses pengukurannya, setiap sampel akan diubah menjadi gambar oleh analisis SEM dan ditampilkan dalam bentuk grafik oleh analisis EDS (Julinawati, 2015).

Metode SEM-EDS adalah langkah awal yang sangat berguna untuk mengkarakterisasi mineral pembentuk batuan. Dengan metode ini, kita bisa mengetahui kandungan unsur dan oksida yang ada dalam mineral, serta memahami sifat fisik dan kimianya. Penggunaan alat SEM-EDS dalam identifikasi ini menghasilkan data yang cepat dan akurat. Selain itu, metode ini juga sederhana dan hanya memerlukan waktu penelitian yang singkat (Julinawati, 2015).

SEM bekerja dengan cara menembakkan berkas elektron dari fiamen (katoda) yang dipanaskan. Elektron ini kemudian ditarik menuju anoda. Setelah itu, lensa elektron akan memfokuskan berkas elektron ke satu titik pada permukaan sampel. Berkas elektron yang sudah terfokus ini akan memindai seluruh permukaan sampel dengan bantuan koil pemindai. Ketika elektron mengenai sampel, mereka akan terpental menjadi elektron sekunder atau elektron hambur balik (backscattered elektron) dari permukaan sampel. Elektron yang terpental ini lalu dideteksi. Sinyal dari detektor kemudian diperkuat oleh ampliflier dan ditampilkan sebagai gambar di monitor (Sari et al., 2014).

*Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS), yang terintegrasi langsung dengan SEM, berfungsi untuk menganalisis komposisi unsur suatu material. Sistem EDS terdiri dari empat komponen utam: sumber sinar, detektor sinar-X, prosesor pulsa, dan penganalisis (*analyzer*). Detektor akan mengubah sinar-X menjadi sinyal, yang kemudian diukur oleh prosesor pulsa. Selanjutnya, informasi ini diteruskan ke penganalisis untuk ditampilkan dan dianalisis. Dengan begitu, EDS mampu mengidentifikasi unsur-unsur yang terkandung dalam sampel beserta presentase beratnya. Namun, perlu dicatat bahwa detektor EDS hanya dapat mendeteksi unsur

dengan nomor atom minimal 4, sehingga unsur seperti Hidrogen (H), Helium (He), dan Litium (Li) tidak dapat terdeteksi (Sari et al., 2014).

SEM-EDS (*Scanning Electrone Microscope-Energy Dispersive Spectrometer*) adalah sebuah sistem analisis terintegrasi yang dirancang untuk pengamatan SEM yang cepat dan jelas, serta analisis unsur EDS yang akurat. Seperti yang digambarkan pada **Gambar 5**, sistem ini menggabungkan fungsi SEM dan EDS dalam satu kesatuan. Secara garis besar, konfigurasi SEM-EDS terbagi menjadi unit SEM dan unit EDS. Unit SEM dilengkapi dengan detektor EDS, sementara panel operasinya terdiri dari dua monitor, keyboard, dan mouse. Sirkuit kontrol EDS, dua komputer, dan *MO disk drive* ditempatkan dalam rak kompak yang berdekatan dengan panel operasi (Yurugi et al., 2001).



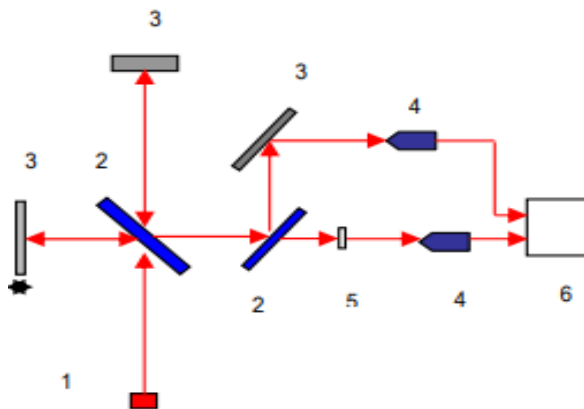
**Gambar 5.** The SEMEDX Integrated System (Martinez, 2010)

Peralatan SEM-EDS dilengkapi dengan dua monitor. Sebelum analisis dimulai, penting untuk menghilangkan molekul udara di dalam alat dengan menutup gas. Hal ini krusial karena elektron yang sangat kecil dan ringan dapat terpecah jika bertabrakan dengan molekul udara sebelum mencapai sampel. Di dalam alat ini, sebuah piston elektron menghasilkan sinar elektron yang kemudian dipercepat oleh anoda. Lensa magnetik lalu memfokuskan elektron ke sampel, dan koil pemindai mengarahkan sinar elektron yang sudah terfokus untuk memindai seluruh permukaan sampel. Selanjutnya, kamera diatur untuk memperlihatkan permukaan sampel, serta kecerahan, perbesaran, dan fokusnya disesuaikan. Pada monitor SEM, ukuran *spot* diatur, sementara pada monitor EDS, proses pengumpulan data dilakukan. Ketika sinar elektron mengenai sampel, sampel akan memancarkan elektron baru yang akan ditangkap oleh detektor dan ditampilkan di monitor. Hasil analisis akan terlihat sebagai gambar permukaan sampel pada monitor SEM dan dalam bentuk grafik atau diagram yang menunjukkan presentase unsur-unsur pada sampel yang dianalisis pada monitor EDS (Julinawati et al., 2015).

Menggunakan metode SEM-EDS, kita bisa mengidentifikasi mineral dalam batuan. Alat ini memberikan informasi tentang jenis-jenis mineral serta kandungan unsur dan oksidanya. Dari data tersebut, kita juga dapat mengetahui sifat fisik dan kimia mineral. Identifikasi dengan SEM-EDS menghasilkan data yang cepat dan akurat. Metode ini juga relatif sederhana karena waktu penelitiannya singkat (Julinawati et al., 2015).

### 1.3.8 Metode FTIR (Fourier Transform Infrared)

FTIR (*Fourier Transform Infrared*) adalah metode analisis inframerah yang menggunakan transformasi Fourier untuk memproses data spektrumnya. Komponen utamanya adalah interferometer Michelson, sebuah perangkat yang bertugas menganalisis frekuensi dari sinyal gabungan. Spektrum inframerah didapat dengan mengukur seberapa banyak cahaya yang melewati sampel lalu membandingkannya dengan cahaya tanpa sampel, semua diukur berdasarkan panjang gelombang. Nantinya, spektrum yang dihasilkan akan ditampilkan dalam bentuk plot intensitas terhadap energi, panjang gelombang (dalam  $\mu\text{m}$ ), atau bilangan gelombang (dalam  $\text{cm}^{-1}$ ) (Marcott, 1986). Analisis gugus fungsi suatu sampel dilakukan dengan membandingkan pita absorpsi yang terbentuk pada spektrum inframerah menggunakan tabel korelasi dan menggunakan spektrum senyawa pembanding (yang sudah diketahui).



**Gambar 6.** Skema alat spektroskopi FTIR. (1) Sumber Inframerah (2) Pembagi Berkas (*Beam Splitter*) (3) Kaca Pemantul (4) Sensor Inframerah (5) Sampel (6) Display

Pada dasarnya, spektrofotometri FTIR memiliki prinsip yang mirip dengan spektrofotometer inframerah dispersi, namun perbedaannya terletak pada pengembangan sistem optiknya sebelum berkas sinar inframerah melewati sampel. Konsep dasar spektrofotometer FTIR ini berasal dari persamaan gelombang yang

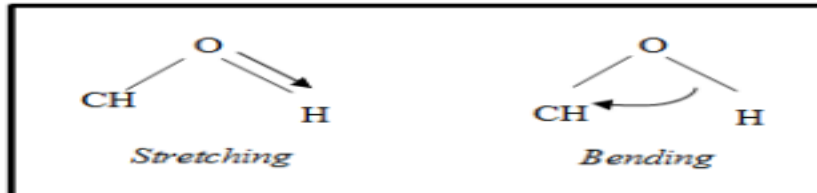
dirumuskan oleh matematikawan Prancis, Jean Baptiste Joseph Fourier (Anam et al., 2007).

Pada metode FTIR, yang diserap oleh sampel adalah radiasi inframerah. Energi inframerah ini diserap oleh ikatan kimia dalam molekul dan menyebabkan terjadinya vibrasi molekul berupa regangan dan tekukan. Setiap jenis ikatan kimia menyerap radiasi inframerah pada bilangan gelombang tertentu, sehingga pola serapan yang dihasilkan dapat digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan jenis mineral penyusun sampel.

Singkatnya, FTIR bekerja untuk mengidentifikasi senyawa, mendeteksi gugus fungsi, dan menganalisis campuran atau sampel. Dalam sebuah molekul, ikatan-ikatan dapat mengalami berbagai jenis molekul. Ada dua tipe utama vibrasi:

1. *Stretching* (Vibrasi Regang/Ulur): Ini adalah di mana ikatan memanjang atau memendek.
2. *Bending* (Vibrasi Lentur/Tekuk): Ini adalah gerakan yang mengubah sudut ikatan, bisa membesar atau mengecil.

Penting untuk diketahui bahwa gerakan vibrasi akan teramati dalam spektrum inframerah hanya jika menghasilkan perubahan momen dipol ( $\mu \neq 0$ ). Jika momen dipol tidak berubah ( $\mu = 0$ ), vibrasi tersebut akan teramati dalam spektrum Raman sebagai gantinya (Wenas & Bujung, 2018).



**Gambar 7.** Tipe Vibrasi Molekul

Analisis FTIR menggunakan sebuah spektrometer untuk mengidentifikasi dan menentukan lokasi puncak-puncak serapan pada spektrum yang dihasilkan. Lokasi spesifik dari puncak serapan ini berfungsi sebagai sidik jari atau ciri khas yang unik untuk mengidentifikasi jenis-jenis senyawa tertentu (Yin et al., 2018).

**Tabel 1.** Pita serapan mineral pada FTIR (Yin et al., 2018)

| Mineral           | Pita absorpsi FTIR (cm <sup>-1</sup> ) |
|-------------------|----------------------------------------|
| <i>Anhydrite</i>  | 1154, 1120, 679, 613, 595              |
| <i>Quartz</i>     | 1164, 1082, 797, 778, 696, 513         |
| <i>Calcite</i>    | 1797, 1447, 875, 713                   |
| <i>Aragonite</i>  | 1476, 857                              |
| <i>Microcline</i> | 646, 534                               |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| <i>Albite</i>                  | 425        |
| <i>Yavapaiite</i>              | 1192       |
| <i>Amorphous Silica</i>        | 1099, 1013 |
| <i>Metakaolinite</i>           | 1030, 562  |
| <i>Portlandite</i>             | 3641       |
| <i>Nitrate</i>                 | 1385       |
| <i>Unknown aluminisilicate</i> | 479, 445   |

Secara umum, metode FTIR banyak digunakan untuk analisis senyawa baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Dalam analisis kuantitatif, teknik ini memberikan gambaran mengenai kadar atau jumlah suatu komponen dalam senyawa. Sementara itu, pada analisis kualitatif, FTIR digunakan untuk mengenali gugus fungsional yang terdapat dalam senyawa tersebut.

Instrumen inframerah bekerja dengan mengukur spektrum getaran dari sampel melalui pancaran radiasi inframerah dan mencatat tingkat penyerapan pada berbagai panjang gelombang. Besarnya energi yang diserap berkaitan dengan jumlah molekul dalam sampel. Energi yang terdeteksi ditampilkan dalam bentuk spektrum frekuensi, yang selanjutnya memberikan informasi mengenai gugus fungsional senyawa berdasarkan wilayah frekuensi serapannya (Bilgic & Bilgic, 2019).

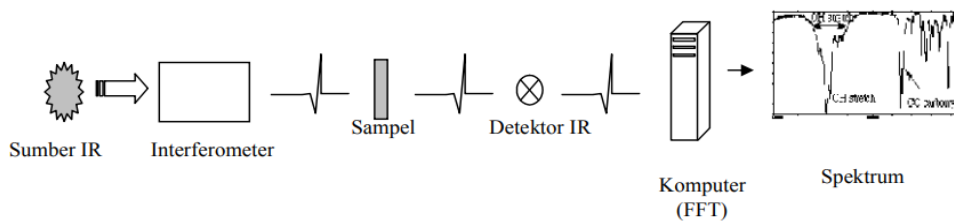
**Tabel 2.** Rentang Frekuensi Gugus Fungsi (Bilgic & Bilgic, 2019)

| Gugus Fungsi                                       | Daerah serapan senyawa (cm <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Al---O-H ( <i>Stretching</i> )                     | 3750-3000                                  |
| Al---O-H ( <i>Inter-octahedral</i> )               | 3660±90                                    |
| H-O-H <i>stretching</i>                            | 3520±200                                   |
| H-O-H <i>stretching</i>                            | 1650                                       |
| Si-O-Si, Si-O <i>stretching</i>                    | 1020                                       |
| Al---O-H <i>stretching</i>                         | 900-850                                    |
| Si-O <i>stretching</i> , Si-O-Al <i>stretching</i> | 1400 dan 525                               |
| (Al, Mg)---O-H                                     | 3718-3680                                  |
| Si-O- (Mg, Al) <i>stretching</i>                   | 1250-800                                   |
| Si-O <i>stretching</i> , Si-O-Al <i>stretching</i> | 790-750                                    |
| Si-O <i>stretching</i> , Si-O-Al <i>stretching</i> | 630                                        |
| Si-O <i>stretching</i> , Si-O-Fe <i>stretching</i> | 540-420                                    |

Dalam metode FTIR, cara kerjanya dimulai ketika sinar inframerah melewati sampel senyawa organik atau anorganik. Pada proses ini, beberapa frekuensi sinar akan diserap, sementara yang lain akan ditransmisikan tanpa diserap. Sinar yang ditransmisikan kemudian ditangkap oleh detektor, yang terhubung ke komputer.



Komputer akan menampilkan hasil analisis sampel dalam bentuk spektrum, menunjukkan hubungan antara intensitas dan bilangan gelombang (Suseno & Firdausi, 2008).



**Gambar 8.** Proses perubahan sinyal pada sistem peralatan spektroskopi FTIR (Suseno & Firdausi, 2008).

**Gambar 8.** mengilustrasikan tahapan dalam spektroskopi FTIR:

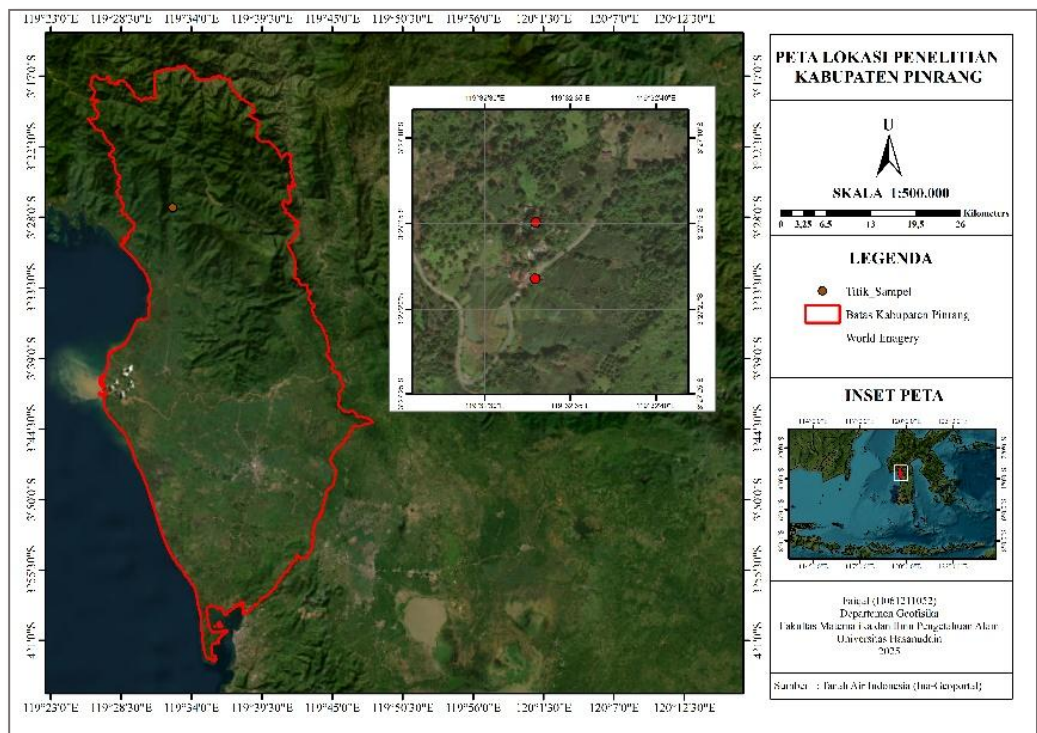
1. **Sumber:** Energi inframerah dipancarkan dari sumber, lalu melewati logam yang mengatur jumlah energi yang akan mencapai sampel.
2. **Interferometer:** Sinar inframerah masuk ke interferometer untuk “spektrum encoding”. Sinyal yang dihasilkan dari interferogram ini kemudian diteruskan ke sampel.
3. **Sampel:** Sinar selanjutnya masuk ke kompartemen sampel dan diteruskan melalui cermin dari permukaan sampel, yang bergantung pada jenis analisisnya.
4. **Detektor:** Sinar akhirnya mencapai detektor untuk pengukuran akhir. Detektor ini dirancang khusus untuk mengukur sinar interferogram. Jenis detektor yang umum digunakan dalam Spektrometer *Fourier Transform Infra Red* adalah *Tetra Glycerine Sulphate* (TGS) atau *Mercury Cadmium Telluride* (MCT). Detektor MCT lebih sering digunakan karena responsnya lebih baik dan sangat selektif terhadap energi vibrasi dari radiasi inframerah, dibandingkan dengan detektor TGS.
5. **Komputer:** Sinyal yang terukur diubah menjadi data dan dikirim ke komputer untuk diproses menggunakan transformasi Fourier. Spektrum yang dihasilkan kemudian siap untuk interpretasi lebih lanjut.

## BAB II METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada tanggal 29 Mei tahun 2025. Lokasi penelitian berada di kawasan pemandian air panas Lemo Susu yang terletak di Desa Betteng, Kecamatan Lembang, Kabupaten Pinrang, Provinsi Sulawesi Selatan. Daerah ini merupakan salah satu lokasi manifestasi panas bumi yang menunjukkan aktivitas geothermal di permukaan, seperti munculnya mata air panas dan alterasi batuan di sekitarnya. Lokasi ini dipilih karena memiliki potensi geothermal yang masih belum banyak diteliti secara detail, terutama dari segi kandungan mineral dan senyawa yang terbentuk akibat proses alterasi hidrotermal.

Berikut lokasi penelitian yang menunjukkan titik pengambilan sampel pada lokasi penelitian sebagaimana ditampilkan **Gambar 9**.



**Gambar 9.** Peta Lokasi Penelitian

### 2.2 Alat dan Bahan

#### 2.2.1 Alat

Berikut adalah beberapa alat yang digunakan dalam penelitian ini beserta fungsinya:

1. GPS (*Global Positioning System*) digunakan untuk menentukan koordinat lokasi pengambilan sampel.
2. Palu geologi digunakan untuk memecah atau menghancurkan batuan yang tersingkap pada permukaan.
3. Alat tulis digunakan untuk memberi label pada sampel yang telah diambil.
4. Plastik sampel digunakan sebagai wadah penyimpanan sampel agar tetap terjaga.
5. Oven digunakan untuk proses pengeringan sampel sebelum tahap analisis lebih lanjut.
6. Mortar digunakan untuk menghaluskan sampel hingga mencapai ukuran yang diinginkan.

### 2.2.2 Bahan

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sampel batuan yang diperoleh dari dua titik di area pemandian air panas Lemo Susu di Desa Betteng, Kecamatan Lembang, Kabupaten Pinrang, Provinsi Sulawesi Selatan.

## 2.3 Prosedur Penelitian

### 2.3.1 Tahap Pengambilan Sampel

Tahapan pengambilan sampel dalam penelitian ini dilakukan sebagai berikut:

1. Menentukan titik koordinat lokasi penelitian yang akan diambil sampelnya dengan menggunakan GPS.
2. Pemecahan atau penghancuran singkapan batuan menggunakan palu geologi di koordinat yang telah ditentukan.
3. Memasukkan sampel kedalam plastik sampel serta memberikan kode atau nama pada sampel yang telah dikumpulkan.
4. Mengulangi langkah-langkah di atas pada koordinat berikutnya.

### 2.3.2 Tahap Preparasi Sampel

Untuk pengujian SEM-EDS, diawali dengan mengeringkan sampel menggunakan *dryer oven* dengan suhu 80° dengan durasi 1 jam. Kemudian memotong batuan dengan memotong batuan dengan diameter maksimal 25 mm dan ketebalan 16 mm. Sampel batuan kemudian diletakkan pada *stage block* yang direkatkan dengan *carbon tip* terlebih dahulu. Kemudian sampel didiamkan untuk dikeringkan dulu. Setelah kering, sampel disemprot dengan blower agar terjaga kebersihannya. Langkah selanjutnya memasukkan *stage block* kedalam *stage holder* yang berdiameter 26,26 mm dengan ketebalan 39 mm. Sampel yang telah dimasukkan kedalam *stage holder* maka selanjutnya sampel siap untuk dianalisis dengan alat SEM (*Scanning Electrone Microscopy*).

Untuk pengujian FTIR, diawali dengan mengeringkan sampel menggunakan *dryer oven* dengan suhu 80° dengan durasi 1 jam. Kemudian dilakukan preparasi sampel secara manual dengan menggunakan palu geologi sampai menjadi keping

kecil, yang kemudian dihaluskan lagi menggunakan mortar dan alu. Kemudian sampel yang telah dipreparasi diuji di Laboratorium menggunakan metode FTIR yang dilakukan di Laboratorium Kimia Terpadu, Fakultas MIPA, Universitas Hasanuddin.

### **2.3.3 Tahap Pengujian Sampel**

Pengujian kandungan sampel batuan dilakukan dari 10 gram bubuk sampel batuan sebagai representasi dari tiap sampel yang kemudian dimasukkan dalam alat pengujian. Pengujian sampel dilakukan di Laboratorium Mikrostruktur Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin menggunakan alat SEM-EDS untuk mengidentifikasi komposisi kimia batuan dan di Laboratorium Kimia Terpadu Departemen Kimia Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin menggunakan alat FTIR untuk mengidentifikasi gugus fungsi mineral.

## 2.4 Bagan Alir

