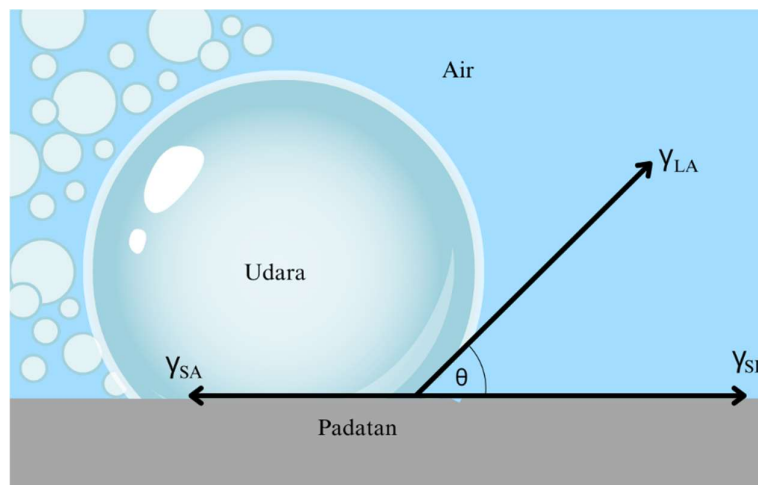


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Flotasi

Flotasi merupakan metode pemisahan mineral berharga dari pengotornya dengan memanfaatkan perbedaan sifat permukaan mineral, yaitu hidrofilik (mampu berinteraksi dengan air) dan hidrofobik (sukar berinteraksi dengan air) [5]. Prinsip dasar flotasi adalah mengapungkan mineral berharga ke permukaan air, sementara mineral pengotor mengendap. Mineral dengan sifat hidrofobik akan menempel pada gelembung udara dan terangkat ke permukaan, dan mineral dengan sifat hidrofilik akan mengendap di dasar kolom. Proses flotasi ini melibatkan tiga fase: padatan, air, dan udara.



Gambar 2. 1 Sudut Kontak Fasa Padat, Cair, dan Udara [3]

Sifat permukaan mineral berkaitan dengan reagen flotasi dalam air dan bergantung pada gaya yang beroperasi pada permukaan tersebut. Gaya yang

cenderung memisahkan partikel dan gelembung ditunjukkan dalam Gambar 2.1. Pada proses flotasi, yang melibatkan tiga fasa (padatan, air, dan udara), dapat diamati pada Gambar 2.1. Ketika ketiga fasa ini, yaitu padat, cair, dan udara, bersentuhan, terbentuk kesetimbangan tegangan antarmuka antara udara-padat, padat-cair, dan cair-udara sebagaimana yang ditunjukkan dalam Persamaan Young-Dupre.

$$\gamma_{SA} = \gamma_{SL} + \gamma_{LA} \cos \theta \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

γ_{SA} = Tegangan permukaan padat-udara

γ_{SL} = Tegangan permukaan padat-cair

γ_{LA} = Tegangan permukaan cair-udara

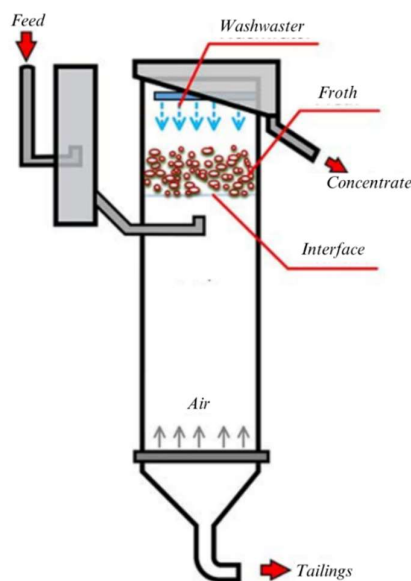
θ = Sudut Kontak

Pada Gambar 2.1 dan persamaan Young-Dupre dapat terlihat bahwa semakin besar sudut kontak, maka akan semakin besar pula kerja adhesi antara partikel dan gelembung. Perubahan sudut kontak ini memengaruhi kekuatan kontak antara bijih dan gelembung udara, yang pada akhirnya mempengaruhi proses pelepasan gelembung dan mineral dengan melibatkan usaha adhesi. Sifat hidrofilik pada permukaan mineral ditandai oleh sudut kontak yang rendah, yaitu kurang dari 90 derajat, sementara sifat hidrofobik ditunjukkan oleh sudut kontak yang lebih dari 90 derajat[9].

2.2 Flotasi Kolom

Teknologi flotasi kolom pertama kali ditemukan oleh Pierre dan Remi,

diperkenalkan dalam industri pada dekade 1980-an. Penerapan umum dari flotasi kolom terjadi terutama pada tahap akhir proses pembersihan bijih seng, tembaga, dan fosfat (Finch dan Dobby, 1991). Kolom flotasi dalam skala industri umumnya berbentuk silinder dengan tinggi 9-14 m dan diameter tidak melebihi 2 m. Berbeda dari flotasi lainnya yang menggunakan agitator sebagai penghasil gelembung udara, pada flotasi kolom gelembung udara dihasilkan melalui *sparger*. Bijih dalam bentuk *pulp* dimasukkan dari bagian atas kolom (sekitar 2/3 tinggi kolom) seperti yang terlihat dalam Gambar 2.3. Pada flotasi kolom terdiri dari dua zona yang berbeda, yaitu *collection zone* dan *froth zone*. *Collection zone* terletak pada bagian bawah flotasi kolom, di bagian partikel akan naik ke permukaan kolom karena bersetuhan dengan gelembung udara yang dihasilkan oleh *sparger* di dasar kolom, sedangkan pada *froth zone* terjadi pemisahan antara gelembung udara dengan partikel.



Gambar 2. 2 Flotasi Kolom [3]

Efektivitas metode flotasi kolom ditinjau dari penggunaan aliran *counter-current* yang dapat mengurangi partikel mineral yang terjebak akibat kurangnya derajat liberasi, serta sistem flotasi kolom yang memiliki *wash water* dapat mengoptimasi tingkat *recovery* berharga tanpa mengurangi kadar yang terkandung di dalamnya. Pada aliran *counter current*, *feed* yang telah di-*conditioning* dimasukan pada kolom flotasi dan pada ketinggian 2/3 tinggi kolom akan bercampur dan berinteraksi dengan gelembung gas yang dialiri dari bagian bawah kolom atau *sparger* [10]. Ketika aliran *counter current* terjadi, gerakan partikel dengan gelembung gas menentukan seberapa besar kemungkinan partikel menempel pada gelembung, seberapa banyak gelembung dapat membawa partikel, dan seberapa cepat proses flotasi terjadi. Hal ini karena *counter-current* mengurangi kecepatan naik gelembung gas ke permukaan. Akibatnya, gelembung gas akan berinteraksi dengan partikel mineral dalam *pulp* lebih lama yang menghasilkan jumlah udara yang perlu dimasukkan ke dalam kolom untuk menghasilkan gelembung gas menjadi lebih sedikit, sehingga efisiensi penggunaan udara meningkat, dan kolom flotasi bekerja lebih efisien [10]. Dalam *froth zone*, seringkali terjadi mineral pengotor akan naik ke permukaan kolom dan berpengaruh pada nilai persen *recovery* yang dihasilkan, sehingga penggunaan *washwater* dapat mengatasi mineral pengotor yang akan naik ke permukaan kolom. *Washwater* terletak pada bagian atas kolom dan berfungsi untuk membersihkan mineral pengotor yang terbawa oleh gelembung udara yang mengangkut mineral berharga dari *froth zone* menuju wadah konsentrat.

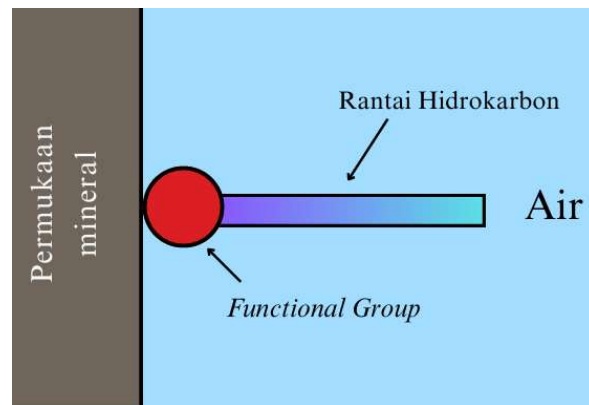
2.3 Reagen Flotasi

Penerapan proses konsentrasi mineral sulfida menggunakan proses flotasi dilakukan dengan penambahan reagen ke dalam *pulp*. Hal tersebut dilakukan dengan tujuan untuk mengubah sifat permukaan mineral sulfida dan dapat mengontrol proses flotasi. Umumnya, reagen yang digunakan adalah kolektor sebagai pengubah sifat permukaan pada mineral sulfida dan membantu mineral untuk merekat pada gelembung, *frother* sebagai pembentuk gelembung yang akan meningkatkan laju tumbukan, serta *modifier* yang berfungsi untuk mengaktivasi dan menurunkan partikel mineral yang tersematkan pada gelembung udara serta mengontrol penyebaran dan pH pada *pulp*.

2.3.1 Kolektor

Proses konsentrasi mineral sulfida dilakukan dengan mengubah sifat permukaan mineral menjadi hidrofobik. Kolektor ditambahkan pada *pulp* sebagai pengubah sifat permukaan mineral. Kolektor yang ditambahkan akan mengurangi lapisan air yang menyelimuti permukaan mineral. Akibatnya, mineral menjadi lebih mudah menempel pada gelembung udara. Kolektor yang digunakan dalam proses flotasi umumnya bersifat heteropolar. Hal ini karena molekul pada kolektor memiliki dua bagian, yaitu gugus non-polar berupa rantai hidrokarbon yang akan mengubah sifat permukaan partikel mineral sulfida, serta gugus polar tidak bermuatan. Gambar 2.3 menunjukkan skematik molekul kolektor dalam mengubah sifat permukaan mineral akibat teradsorpsinya molekul dan menghasilkan gugus non-polar hidrokarbon yang mengarah ke air sehingga partikel bersifat

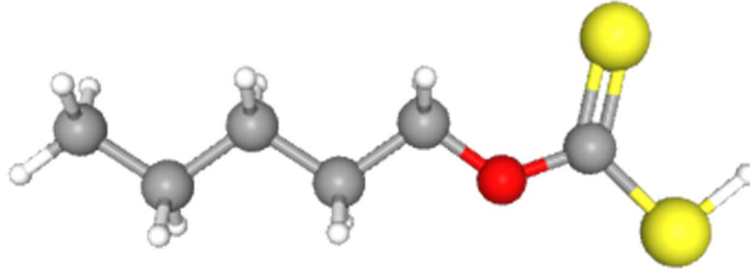
hidrofobik.



Gambar 2. 3 Skema Adsorpsi Molekul Kolektor pada Permukaan Mineral [11]

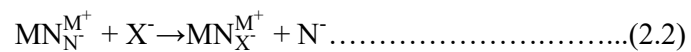
Apabila menyesuaikan dengan jenis mineral yang digunakan dalam proses konsentrasi menggunakan flotasi, kolektor yang bersifat mengionisasi terbagi kedalam jenis anionik dan kationik. Aplikasi mineral sulfida dan non-sulfida sebagai bahan baku dalam proses flotasi digunakan kolektor dengan jenis anionik dan kationik. Kolektor anionik yang digunakan pada mineral sulfida adalah sulfhydryl. Jenis-jenis kolektor yang umum digunakan dalam mineral sulfida seperti galena, sphalerit, kalkopirit, dan pirit merupakan jenis xanthate. Selain xanthate, kolektor lain yang dapat digunakan dalam proses flotasi bijih pirit meliputi dithiophosphate dan dithiocarbamate. *Xanthate* memiliki rantai alkil dari C_2 hingga C_6 [3]. Rantai alkil *xanthate* yang umum adalah etil, isopropil, isobutil, dan amil. Berikut struktur kolektor *xanthate* dapat dilihat pada Gambar 2.4, Saat *xanthate* dilarutkan dalam air, *xanthate* cenderung terurai atau rusak. Proses penguraian ini menjadi lebih cepat ketika larutan semakin asam.

Sebaliknya, *xanthate* akan lebih stabil dalam larutan yang bersifat basa.



Gambar 2. 4 Struktur Kolektor *Xanthate* [12].

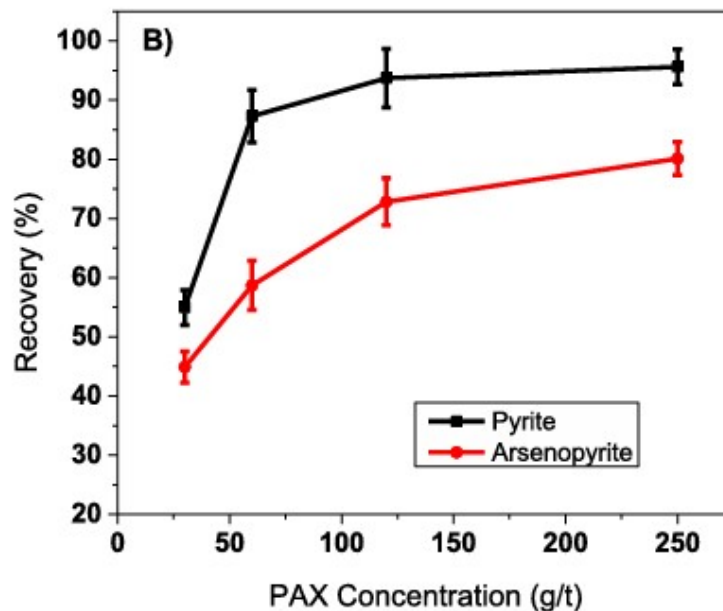
Penggunaan kolektor jenis *xanthate* pada dasarnya mempengaruhi peningkatan konsentrasi anion sulfur/sulfida pada mineral dan terganti dengan anion pada sisa kolektor akibat penurunan anion molekul *xanthate* seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 2.2 [13].



Penggunaan kolektor sebagai reagen utama proses flotasi digunakan dapat mempengaruhi nilai persen *recovery* yang diperoleh. Utamanya, semakin banyak jumlah kolektor yang digunakan, maka nilai persen *recovery* yang diperoleh akan semakin tinggi. Namun, nilai persen *recovery* juga akan menurun apabila penambahan jumlah kolektor ditingkatkan pada penambahan jumlah kolektor yang berlebih. Hal tersebut dikarenakan dengan penambahan lebih banyak kolektor akan mengubah sifat permukaan partikel mineral sulfida menjadi lebih hidrofobik.

Dalam penelitian ini, penambahan kolektor potassium amyl xanthate (PAX) yang digunakan adalah 20, 30, 40, dan 50 ppm untuk

mengetahui pengaruhnya terhadap *recovery* proses flotasi hingga titik optimal tertentu. Gambar 2.5 menjelaskan mengenai penelitian yang dilakukan oleh Forson tahun 2021, bahwa peningkatan konsentrasi PAX dari 30 ppm hingga 120 ppm dapat meningkatkan flotasi pirit secara signifikan [14]. Namun, pada konsentrasi yang lebih tinggi dari 120 ppm, peningkatan *recovery* cenderung melambat, bahkan dapat menurun karena adanya efek kejenuhan permukaan partikel. Hal ini disebabkan oleh penumpukan kolektor berlebih yang dapat mengurangi selektivitas flotasi dan meningkatkan adsorpsi pada partikel *gangue*. Pada konsentrasi kolektor yang sangat tinggi, interaksi hidrofobik antar partikel dapat menyebabkan penggumpalan (aglomerasi), yang mengurangi efisiensi proses flotasi.



Gambar 2. 5 Pengaruh Penambahan Kolektor PAX terhadap *Recovery* Proses Flotasi Pirit [14].

2.3.2 *Frother*

Frother termasuk kedalam jenis surfaktan yang aktif dalam *interface* antara padatan dan cairan. *Frother* pada dasarnya akan menyebabkan teradsorpsinya *interface* tersebut sehingga menurunkan tegangan permukaan air. Oleh karena itu, pengaplikasian *frother* sebagai reagen dalam *pulp* flotasi akan membentuk gelembung yang stabil. Selain itu, pengaplikasian *frother* akan mempertahankan jumlah gelembung yang terbentuk dengan menjaga ukurannya tetap kecil dan menurunkan kecepatan gelembung yang mengapung naik. Penambahan *frother* pada *pulp* flotasi akan menyebabkan dipol pada air bergabung dengan tetap mempertahankan reaksi pada kolektor kelompok hidrokarbon sehingga peran dari kolektor tidak tergantikan [5]. Salah satu *frother* yang biasa digunakan dalam proses flotasi dengan menggunakan *pine oil*. *Pine oil* terbukti sebagai *frother* yang paling aktif secara permukaan, kemampuan dalam menurunkan tegangan permukaan secara signifikan menonjol dibandingkan dengan *frother* lain, karakteristik ini menunjukkan bahwa *pine oil* memiliki afinitas yang kuat terhadap antarmuka udara-air [15]. Hal ini yang merupakan sifat penting dalam pembentukan dan stabilitas gelembung.

2.4 Persen Solid

Persen Solid berpengaruh terhadap nilai persen *recovery*, nilai *recovery* yang diperoleh akan meningkat apabila persen solid ditingkatkan. Hal tersebut

dikarenakan lebih banyak partikel yang bertumbuk dan menempel pada gelembung dan mengapung bersama gelembung. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Yianatos tahun 2013 menjelaskan bahwa persen solid yang lebih tinggi dapat meningkatkan kemungkinan tumbukan antar partikel pirit dengan gelembung udara yang berpotensi meningkatkan *recovery* [16]. Namun apabila ditinjau dari literatur, penambahan persen solid lebih dari 40% akan menimbulkan kondisi *over-crowding* yang mengindikasikan hubungan antara luas permukaan dan jumlah partikel yang akan menempel berbanding terbalik secara drastis. Selain itu, dengan penambahan jumlah padatan yang diumpankan akan berpotensi menurunkan dispersi pada partikel sehingga kinerja reagen dalam mengadsorpsi partikel menjadi berkurang [17]. Faktor yang menyebabkan menghambatnya efektivitas proses flotasi mineral akibat persen padatan yang tinggi adalah terbentuknya gelembung udara yang berlebihan dan pelekatan mineral yang terlalu banyak pada gelembung udara, yang mengakibatkan pecahnya gelembung sehingga mineral tidak dapat terangkat ke permukaan buih [18]. Oleh karena itu, penggunaan persen solid apabila dibandingkan dengan jumlah gelembung yang terbentuk harus linear sehingga tidak menimbulkan penurunan persen *recovery* dari mineral berharga itu sendiri.

2.5 Performa Metalurgi

Performa metalurgi yang digunakan merupakan efisiensi suatu proses pengolahan mineral dengan menghitung nilai *recovery* dan kadar dalam tiap proses. *Recovery* merupakan banyaknya mineral berharga yang dapat diambil dalam suatu proses, sedangkan kadar merupakan persentase total logam yang terkandung dalam

bijih yang berhasil dipisahkan ke dalam konsentrat. Konsentrat merupakan bijih yang mengandung mineral berharga dengan sebagian kecil mineral pengotor. Tujuan dari melakukan perhitungan ini untuk menentukan distribusi nilai logam yang terkandung dalam *input* di antara produk pemisahan [9]. Performa metalurgi dapat dihitung menggunakan rumus *recovery* dan Persamaan 2.3 dengan total mineral berharga dalam bijih yang berhasil diambil dalam suatu keadaan [9].

$$R = \frac{C \times c}{F \times f} \times 100\% \dots \dots \dots (2.3)$$

2.6 Sensor Kapasitif

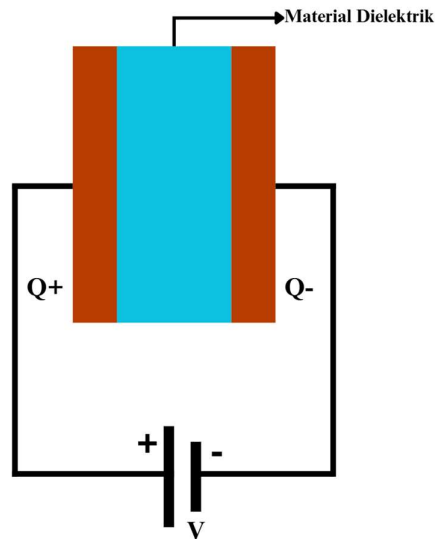
Kapasitor merupakan komponen listrik yang digunakan untuk menyimpan muatan listrik. Kapasitor memiliki muatan positif dan negatif yang menempel di masing-masing pelat. Muatan yang terdapat di dalam kapasitor bersifat sementara, karena fungsi dari kapasitor berguna untuk membuat arus yang mengalir menjadi stabil [19]. Salah satu jenis kapasitor adalah kapasitor pelat sejajar yang terdiri dari dua pelat konduktor ditempatkan berdekatan yang dipisahkan oleh bahan isolator. Penambahan bahan dielektrik di antara kedua pelat kapasitor, penambahan ini bertujuan untuk meningkatkan kapasitansi kapasitor. Bahan dielektrik (isolator) tersebut dapat berupa mika, udara, karet maupun bahan lainnya [20].

Kapasitor pelat sejajar yang masing-masing memiliki luas (A) dan dipisahkan oleh jarak (d) dengan menempatkan bahan dielektrik yang memiliki konstanta dielektrik (K) diantara kedua pelat sejajar maka nilai kapasitansi kapasitor dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$C = K \epsilon_0 \frac{A}{d} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana ϵ_0 adalah konstanta permitivitas vakum yang bernilai $8,85 \times 10^{-12}$ F/m.

Ukuran dari kemampuan suatu kapasitor untuk menyimpan muatan listrik disebut kapasitansi [21]. Satuan kapasitansi adalah Farad (F). Dilihat dari Persamaan 2.4, nilai kapasitansi akan meningkat jika material dielektrik yang digunakan memiliki nilai konstanta dielektrik makin besar, luas penampang pelat kapasitor makin besar, dan jarak antar kedua pelat diperkecil. Material dielektrik merupakan suatu material yang dapat bereaksi ketika diberi aliran listrik. Ketika listrik dialirkan, atom-atom dan molekul mengalami suatu proses yang disebut polarisasi, yaitu muatan positif dan negatif yang awalnya berada pada posisi yang sama akan saling menjauh dan fenomena ini hanya terjadi saat ada aliran listrik.



Gambar 2.6 Kapasitor pelat sejajar [22].

Kapasitor memiliki aplikasi lain yaitu dapat dimanfaatkan sebagai sensor kapasitif. Sensor merupakan alat yang digunakan untuk merubah suatu besaran fisik menjadi besaran listrik sehingga dapat dianalisa dengan rangkaian listrik tertentu

[21]. Sensor kapasitif bekerja berdasarkan metode kapasitif yang berfungsi untuk mendeteksi perubahan komposisi bahan dielektrik dengan menentukan nilai kapasitansi dan konstanta dielektrik. Energi yang tersimpan dalam kapasitor dengan beda potensial tetap akan bertambah jika tetapan dielektrik materialnya bertambah [20]. Semakin besar permitivitas suatu material, semakin besar kapasitansi yang dihasilkan. Sebagai contoh, udara vakum memiliki permitivitas 1; udara 1,00058986; minyak 2,1; garam 15; silikon 11; gliserin 41; air 80 [23]. Sensor kapasitif terdiri dari dua pelat konduktor yang berperan sebagai *transmitter* (pemancar sinyal) dan *receiver* (penerima sinyal). Sensor kapasitif merupakan salah satu implementasi dari teknik tomografi untuk mendeteksi perubahan komposisi bahan dielektrik.

2.7 Grain Counting

Metode *grain counting* merupakan teknik yang digunakan untuk menghitung jumlah butiran mineral dalam suatu sampel dengan tujuan untuk menentukan kadar dan *recovery* dari proses pengolahan mineral. Dalam praktiknya, metode ini dapat dilakukan secara manual menggunakan mikroskop optik, di mana butiran mineral diidentifikasi satu per satu oleh operator. Namun, pendekatan manual ini memiliki keterbatasan signifikan, seperti proses yang memakan waktu, membutuhkan keahlian khusus, serta rentan terhadap kesalahan akibat kelelahan operator.

Dalam praktiknya, perhitungan butiran mineral dapat dilakukan menggunakan berbagai metode, seperti *ribbon counting*, di mana butiran dihitung dalam pita-pita tertentu yang dipilih secara acak, dan *cluster counting*, teknik

terbaru yang mengurangi kesalahan penghitungan dengan distribusi yang lebih representatif dari seluruh sampel [24]. Dalam setiap *cluster*, sejumlah butiran dipilih secara acak dan dihitung untuk menghasilkan perkiraan yang lebih representatif terhadap keseluruhan sampel.

Keunggulan utama dari *cluster counting* adalah kemampuannya untuk mengurangi bias dalam perhitungan dan meningkatkan kesesuaian antara hasil penghitungan dan proporsi mineral yang sebenarnya dalam sampel [24]. Kesalahan dalam metode *grain counting* dapat timbul akibat heterogenitas spasial dalam distribusi butiran mineral, sehingga pemilihan metode perhitungan yang tepat sangat penting untuk mendapatkan hasil yang representatif dan signifikan secara statistik. Dengan meningkatnya kemajuan dalam teknologi pemrosesan citra dan analisis data, metode perhitungan berbasis digital kini juga digunakan untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam analisis *grain counting*.

Sistem penghitungan butir berbasis citra terdiri dari tiga komponen utama, yaitu unit akuisisi citra, unit analisis citra, dan unit pendukung. Unit akuisisi citra melibatkan kamera digital, sumber cahaya, dan kartu akuisisi citra [25]. Kamera digital menangkap gambar partikel yang telah disebar merata menggunakan mekanisme getaran untuk meminimalkan tumpang tindih antarbutir. Sumber cahaya seragam diperlukan untuk memastikan pencahayaan yang konsisten, sehingga meningkatkan kualitas gambar yang diambil. Dalam penelitian ini, *grain counting* dilakukan menggunakan *software* ImageJ, yang menyediakan berbagai fitur analisis citra untuk menghitung jumlah butir secara akurat.

Proses analisis citra diawali dengan transformasi citra berwarna (RGB)

menjadi citra *grayscale*. Transformasi ini dilakukan untuk mengurangi kompleksitas data dengan hanya mempertahankan informasi intensitas cahaya. Selanjutnya, proses denoising dilakukan menggunakan metode *median filtering* untuk menghilangkan *noise* tanpa mengurangi detail penting pada tepi gambar. Setelah itu, citra *grayscale* diubah menjadi citra biner menggunakan teknik binarisasi [25].

Langkah penting berikutnya adalah pelabelan komponen terhubung pada citra biner. Setiap area terhubung dalam citra diberi label unik, yang memungkinkan sistem untuk menghitung jumlah objek yang ada [25]. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa metode ini mampu menghitung jumlah butir dengan akurasi tinggi dan kesalahan minimal. Keunggulan utama teknologi ini adalah efisiensinya dalam mengurangi beban kerja manual dan meningkatkan akurasi dibandingkan metode tradisional. Selain itu, teknologi ini juga dapat diterapkan untuk analisis lebih lanjut, seperti klasifikasi dan pengukuran kualitas biji-bijian.