

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara berkembang yang tengah berusaha memajukan perekonomian negaranya dengan meningkatkan pembangunan sektor industri (Afifudin dkk., 2022). Hal ini dapat dilihat dengan pesatnya kemajuan industri migas. Seiring dengan berkembangnya industri tersebut di Indonesia, maka semakin banyak pula limbah yang dihasilkan. Limbah sendiri merupakan produk samping dari kemajuan teknologi. Pada industri migas, salah satu limbah yang dihasilkan adalah limbah cair. Dalam limbah cair yang dihasilkan industri migas terkandung zat logam berat yang disebabkan oleh proses korosi peralatan logam maupun penggunaan katalis (Halim dkk., 2021).

Keberadaan zat logam berat yang terkandung dalam limbah cair tidak selamanya berdampak buruk bagi ekosistem lingkungan. Pada konsentrasi tertentu, zat logam dapat mendukung pertumbuhan beberapa mikroorganisme dan alga. Namun pada konsentrasi yang melebihi ambang batas, zat logam dapat bersifat toksik. Dalam industri migas sendiri menghasilkan limbah cair yang mengandung berbagai macam jenis logam berat. Menurut Lawan dkk., (2023), industri migas dapat menghasilkan limbah industri yang menghasilkan zat logam berat dengan rentang konsentrasi beragam. Diantaranya seperti tembaga (Cu) dengan rentang 0,10-3,35 mg/L, besi (Fe) 0,10-3,30 mg/L, seng (Zn) 0,01-2,50 mg/L, timbal (Pb) 0,004 – 1,45 mg/L, kromium (Cr) 0,02-1,1- mg/L, dan masih banyak lainnya. Salah satu zat logam berat yang terkandung dalam air limbah industri migas adalah tembaga (Cu). Logam tembaga (Cu) merupakan salah satu logam yang diperlukan secara renik dan bersifat esensial bagi makhluk hidup. Namun, kadar tembaga (Cu) yang diperlukan perlu diperhatikan. Apabila kadar tembaga (Cu) melebihi ambang batas yang telah diatur dalam peraturan mengenai Baku Mutu Air Limbah Industri, maka dapat bersifat toksik dan membahayakan kesehatan manusia dan merusak ekosistem, khususnya ekosistem perairan (Fitriyanto, dkk., 2016).

Selain industri migas, Indonesia juga memiliki kemajuan pesat dalam industri makanan dan minuman atau *food and beverages* (F&B). Peningkatan ini didorong oleh tingginya minat dan kebutuhan masyarakat akan makanan dan minuman yang cepat saji dan efisien waktu. Selain itu, industri F&B juga menarik perhatian masyarakat dengan menyediakan tempat yang nyaman untuk melakukan pertemuan bisnis, atau sekedar bersantai bersama teman dan keluarga. Diantara sub-sektor industri F&B yang paling pesat peningkatannya adalah *coffee shop* (Sinulingga dkk., 2024). Hal ini dapat dilihat dengan maraknya *coffee shop* yang hadir dengan berbagai inovasi menu yang dibuat dari kopi sebagai bahan utama. Di Balikpapan sendiri, menurut data yang dikeluarkan oleh Pemerintah Kota Balikpapan tahun 2024, jumlah *coffee shop* di Kota Balikpapan tercatat sebanyak 110 unit pada tahun 2020, dan meningkat menjadi 122 unit pada tahun 2024. Dengan demikian, dalam kurun waktu lima tahun terakhir (2020–2024) terjadi peningkatan sebesar $\pm 10,9\%$ dengan rata-rata peningkatan tahunan sekitar $2,6\%$. Data ini menunjukkan bahwa perkembangan *coffee shop* di Kota Balikpapan cukup pesat dan konsisten dari tahun ke tahun. *Coffee shop* umumnya menawarkan menu dari olahan

kopi, dimana sebelum kopi disajikan menjadi olahan minuman, biji kopi mengalami beberapa pengolahan. Pengolahannya diantaranya adalah proses *roasting* (penyangraian), *grinding* (penggilingan), dan *extraction* (penyeduhan). *Coffee shop* biasanya akan menyajikan menu minuman yang terbuat dari biji kopi yang digiling menjadi bubuk, sebelum kemudian diekstraksi dengan cara diseduh (Iskandar & Khoirunisa, 2021), sementara biji kopi yang digunakan berasal dari industri pengolahan kopi (*roastery*) atau rumah *roasting* yang memproduksi biji kopi mentah yang telah disangrai.

Rumah *roasting* merupakan industri pengolahan kopi yang memanfaatkan teknologi penyangrai kopi atau mesin *roasting* untuk secara khusus mengolah biji kopi mentah (*green bean*) menjadi kopi sangrai (*roasted bean*). *Roasted bean* yang telah melalui proses sangrai kemudian melalui proses pengelompokkan (*grading*) untuk dikomersilkan ke *coffee shop* yang kemudian digiling dan diseduh sebelum disajikan menjadi minuman kopi (Manurung dkk., 2020). Tanaman kopi memiliki beberapa jenis, salah satu diantaranya adalah *Coffea Canephora* atau yang biasa disebut dengan kopi robusta. Tanaman kopi robusta akan menghasilkan biji kopi yang memiliki mutu tinggi apabila mendapatkan penanganan serta pengolahan yang baik pada proses panen dan pasca panen. Biji kopi bermutu tinggi dapat dilihat dari karakteristiknya, dimana proses pasca panen seperti penyangraian menjadi faktor penentu (Lazuardi dkk., 2024).

Kota Balikpapan memiliki 5 rumah *roasting* yang beroperasi dalam memproduksi *roasted beans*, salah satunya adalah Skynus Roastery. Skynus Roastery adalah rumah *roasting* biji kopi mentah yang berlokasi di Balikpapan, Kalimantan Timur. Biji kopi memiliki aroma dan rasa yang dipengaruhi oleh tingkat penyangraianya (*roasting*). Maka dalam proses penyangraianya, diklasifikasikan menjadi 4 level, yaitu *unroasted*, *light roasted*, *medium roasted*, dan *dark roasted* (Alfiantama, 2024). Skynus Roastery telah beroperasi dalam memproduksi biji kopi sangrai selama 3 tahun. Dalam pengoperasiannya, Skynus Roastery telah mendistribusikan biji kopi sangrai (*roasted beans*) kepada lebih dari 30 *coffee shop* yang ada di Balikpapan dengan rata-rata produksi 500-800 kg biji kopi sangrai siap jual perbulannya. Melihat dari banyaknya biji kopi yang telah diolah dan diproduksi, maka sudah pasti ada limbah yang dihasilkan dari produk samping dari pengolahannya (Halim dkk., 2021). Skynus Roastery sendiri menghasilkan limbah kopi hasil dari proses pengolahan sebanyak 50 kg setiap bulannya. Dengan demikian, terdapat sebesar 6-10% dari hasil produksi biji kopi sangrai merupakan limbah kopi yang tidak melalui pengolahan lebih lanjut. Sementara 4 rumah *roasting* lain yang beroperasi di Balikpapan menghasilkan jumlah limbah kopi yang beragam mulai dari 10 kg sampai dengan 40 kg. Hal ini mengakibatkan pada Kota Balikpapan sendiri dihasilkan setidaknya 100-150 kg limbah kopi perbulannya.

Dalam pengolahannya, Skynus Roastery melakukan proses *grading* terhadap biji kopi robusta yang kemudian dibedakan menjadi 4 *grade* (kelas). Pada *grade* terakhir, biji kopi yang tidak lolos proses *grading* menjadi limbah. Setiap bulannya, rumah *roasting* Skynus Roastery menghasilkan limbah sebesar ± 50 kg yang terdiri dari kulit ari, *green bean* dan *black bean*. Menurut Alfiantama (2024), limbah kopi dapat dihasilkan dari penyusutan biji kopi pada saat proses *roasting*. Pada umumnya, susut *roasting* dapat mencapai 15% dari keseluruhan biji kopi yang melalui proses *roasting*. Limbah yang dihasilkan juga dapat berasal dari proses *grading* yang memisahkan biji kopi berkualitas

prima dengan biji kopi yang telah membusuk. Adapun *green bean* artinya biji kopi yang masih hijau, sementara *black bean* artinya biji kopi yang sudah mengalami pembusukkan pada fase pasca panen. Pembusukkan ini biasa terjadi karna biji kopi yang sudah terlalu tua, namun karena proses panen dilakukan dalam jumlah besar dan disortir secara manual, masih ada beberapa *black bean* yang kemudian ditemukan dalam proses *roasting*. Kedua limbah *green* dan *black bean* berasal dari jenis kopi yang sama, yaitu kopi robusta (*coffea canephora*). Komposisi dari limbah kopi *green* dan *black bean* mengandung biji kopi dan kulit ari kopi.

Adapun dampak yang ditimbulkan dari keberadaan limbah kopi terhadap lingkungan salah satunya adalah pencemaran air. Limbah kopi yang telah melalui proses pengolahan, secara alami mengandung tingkat BOD (*Biochemicals Oxygen Demand*) dan COD (*Chemicals Oxygen Demand*) yang tinggi. Menurut Novita dkk., (2023), nilai BOD yang didapatkan pada badan air yang menjadi tempat pembuangan limbah kopi menunjukkan nilai sebesar 3770 mg/L, sementara nilai COD didapatkan sebesar 4302 mg/L. Hal ini dikarenakan mikroorganisme menghabiskan banyak oksigen untuk menguraikan limbah kopi, namun tidak akan ada cukup oksigen bagi biota air sehingga dapat merusak keseimbangan kehidupan bagi biota air. Selain menyebabkan penurunan kualitas oksigen, jumlah limbah kopi yang tinggi dari industri *roasting* dan *coffee shop* menyebabkan penumpukan material organik yang sulit diolah karena kadar lignin yang tinggi membuatnya lambat terdegradasi secara alami.

Limbah kopi yang berupa *green* dan *black bean* pada umumnya mengandung senyawa aktif yang dapat mengikat logam berat. Struktur permukaan limbah biji kopi yang berpori dan permukaan yang cukup besar menjadikannya berpotensi menjadi adsorben yang dapat mereduksi kandungan zat logam berat. Selain itu, pembuatan adsorben dari limbah kopi memiliki potensi yang besar dari segi ekonomis dikarenakan potensi keberadaannya dalam jumlah yang besar dan memiliki afinitas yang baik untuk menyerap zat logam berat yang terkandung dalam limbah cair (Pramitasari dkk., 2021).

Menimbang dari meningkatnya kemajuan industri di Indonesia yang berpotensi menghasilkan limbah cair mengandung zat logam berat seperti tembaga (Cu) didalamnya dan dalam rangka memanfaatkan produksi limbah kopi dari rumah *roasting* dengan sebaik mungkin, maka penulis merencanakan pemanfaatan limbah kopi robusta (*coffea canephora*) dalam bentuk *green* dan *black bean* untuk ditransformasikan menjadi adsorben yang dapat mereduksi zat logam berat tembaga (Cu) melalui proses aktivasi adsorben, kemudian membandingkan efektifitas dari kedua *green* dan *black bean* dalam mereduksi zat logam berat tembaga (Cu).

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian tugas akhir ini sebagai berikut.

1. Bagaimana karakteristik dari adsorben limbah kopi (*Coffea Canephora*) berdasarkan SNI Nomor 06-3730-1995?
2. Bagaimana perbandingan efektifitas adsorpsi limbah kopi (*Coffea Canephora*) antara *green* dan *black bean* dalam mereduksi logam tembaga (Cu)?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian tugas akhir ini sebagai berikut.

1. Menganalisis karakteristik dari adsorben limbah kopi (*Coffea Canephora*) berdasarkan SNI Nomor 06-3730-1995.
2. Membandingkan efektifitas adsorpsi antara limbah kopi (*Coffea Canephora*) dalam bentuk *green* atau *black bean* dalam mereduksi logam tembaga (Cu).

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian tugas akhir ini sebagai berikut.

1. Bagi Peneliti
Memberikan wawasan dan pengalaman lebih dalam setelah melakukan penelitian yang memanfaatkan limbah biji kopi sebagai adsorben.
2. Bagi Akademisi
Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam bidang pengolahan limbah dan menjadi referensi tambahan bagi penelitian mendatang.
3. Bagi Masyarakat
Hasil penelitian ini diharapkan dapat menambah pengetahuan tentang alternatif penanganan limbah logam berat di perairan dengan memanfaatkan pengolahan limbah organik.

1.5 Batasan Penelitian

Adapun batasan dalam penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Adsorben berasal dari limbah kopi (*coffea canephora*) dalam bentuk *green* dan *black bean* yang diperoleh dari rumah *roasting* Skynus Roastery.
2. Aktivasi adsorben menggunakan aktivator berupa H_3PO_4 dengan konsentrasi 0,75 M. Menurut penelitian (Haziza dkk., 2024), variasi konsentrasi H_3PO_4 yakni 0,25 M; 0,50 M; dan 0,75 M dimana H_3PO_4 dengan konsentrasi 0,75 M merupakan titik optimal dari rentang variasi dengan kapasitas adsorpsi tembaga (Cu) paling baik.
3. Tahap adsorpsi dengan waktu kontak 24 jam. Menurut (Haziza dkk., 2024), adsorpsi lebih optimal sebesar 99% dibandingkan 48 jam yaitu 89%
4. Karakteristik adsorben yang diuji menyesuaikan dengan SNI Nomor 06-3730-1995.

1.6 Teori

1.6.1 Kopi Robusta (*Coffea Canephora*)

Tanaman kopi termasuk kedalam genus *Coffea* dengan famili *Rubiaceae*. Dalam famili *Rubiaceae*, genus *coffea* memiliki hamper 70 spesies yang berbeda, namun spesies yang paling banyak ditanam di seluruh dunia adalah *coffea canephora*. Adapun taksonomi kopi secara lengkap menurut Rahardjo (2012), adalah sebagai berikut:

Kerajaan: Plantae

Sub-kerajaan: Tracheobionta

Super divisi: Spermatophyta

Divisi: Magnoliophyta

Kelas: Magnoliopsida
 Sub-kelas: Asteridae
 Ordo: Rubiales
 Famili: Rubiaceae
 Genus: *Coffea*
 Spesies: *Coffea Canephora*

Menurut Panggabean (2012), fisiologi tanaman kopi terbagi menjadi beberapa bagian, diantaranya:

1. Akar

Tanaman kopi memiliki jenis akar tunggang yang beberapa akar kecilnya tumbuh menyamping atau melebar. Akar kecil inilah yang kemudian disebut akar lebar, dimana pada bagian ini tumbuh beberapa bagian penting yang berperan dalam memberi perlindungan akar saat proses penghisapan unsur hara dari tanah, seperti akar rambu, bulu-bulu akar, serta tudung akar.

2. Percabangan

Secara morfologi, tanaman kopi robusta (*coffea canephora*) memiliki tipe pertumbuhan cabang plagiotropik, atau ke arah horizontal, yang artinya cabang primer pada tanaman kopi robusta tumbuh secara menyamping dari batang utama. Pola pertumbuhan ini memiliki peran yang penting terhadap produktivitas buah, penyerapan sinar matahari yang dilakukan tanaman, dan efektivitas dari pemangkasan. Cabang plagiotropik merupakan tempat utama tumbuhnya bunga dan buah pada tanaman kopi. Percabangan yang tumbuh secara horizontal mengakibatkan tersedianya ruang yang lebih luas dengan posisi yang lebih ideal untuk mendukung pertumbuhan bunga dan pembuahan terjadi secara maksimal. Akibatnya, kompetisi antar buah yang terjadi dalam satu cabang berkurang, sehingga produksi buah yang busuk akan semakin sedikit dan pendistribusian buah menjadi lebih merata. Pertumbuhan arah cabang yang mendatar memungkinkan daun untuk menerima asupan sinar matahari secara lebih merata, sehingga mendukung proses fotosintesis yang optimal untuk pembentukan buah. Adapun cabang plagiotropik yang tumbuh secara horizontal memudahkan petani untuk menjangkau, sehingga proses pemangkasan atau panen terjadi lebih efektif.



Gambar 1. Ilustrasi percabangan tanaman kopi
 Sumber: (Panggabean, 2012)

3. Daun

Langkah paling mudah yang dapat dilakukan untuk membedakan jenis tanaman kopi adalah dengan memerhatikan bentuk daunnya. Secara umum, daun tanaman kopi memiliki ciri fisik yang hampir sama, yaitu berbentuk lonjong menyerupai telur, bergaris ke arah samping, memiliki gelombang menyerupai talang air, berwarna hijau pekat, serta ujung daun yang meruncing. Daun tumbuhan kopi umumnya tumbuh secara bersebelahan di bagian ketiak batang, cabang, dan ranting. Untuk mengetahui jenis tanaman kopi robusta (*coffea canephora*) dari karakteristik daunnya dapat diperhatikan dari tekstur daun, ketebalan daun, serta warna yang dimiliki daun. Kopi robusta (*coffea canephora*) memiliki tekstur dan ketebalan daun yang lebih tebal dibandingkan dengan jenis tanaman kopi arabika. Kemudian kopi robusta (*coffea canephora*) memiliki warna daun yang lebih terang dan kurang pekat.



Gambar 2. Daun tanaman *Coffea Canephora*
Sumber: (Panggabean, 2012)

4. Bunga

Tanaman kopi termasuk kedalam golongan tanaman berbunga (*Angiospermae*). *Angiospermae* artinya tumbuhan berbiji tertutup, dimana biji dilindungi oleh buah. Bunga yang dihasilkan oleh *Coffea Canephora* kemudian menjadi tempat terjadinya penyerbukan dan pembuahan dimana nantinya akan dihasilkan buah kopi (*cherry*) yang berisi biji kopi. Semua spesies kopi memiliki ciri bunga yang sama, yaitu berwarna putih dan memiliki aroma khas kopi yang wangi. Bunga pada tanaman kopi umumnya muncul pada ketiak daunnya. *Coffea Canephora* biasanya akan membentuk bunga kopi pada akhir musim hujan, sebelum menghasilkan buah yang siap dipanen pada awal musim kemarau.



Gambar 3. Bakal bunga *Coffea Canephora*
Sumber: (Panggabean, 2012)

5. Buah

Coffea canephora umumnya membutuhkan waktu sekitar 2,5 sampai 3 tahun untuk dapat menghasilkan buah kopi pertama yang dapat dipanen. Dalam proses pembentukannya, *coffea canephora* membutuhkan waktu sekitar 7 sampai 12 bulan untuk menghasilkan buah kopi. Buah kopi yang masih mentah memiliki warna hijau muda, yang kemudian akan berubah menjadi merah tua saat buah sudah matang sempurna (*ripe*).



Gambar 4. Perubahan warna buah *Coffea Canephora*

Sumber: (Panggabean, 2012)

Sementara itu, buah kopi tersusun menjadi beberapa bagian, antara lain kulit buah (epicarp), daging buah (mesocarp), kulit tanduk (endocarp), dan biji yang masih dibungkus dengan kulit ari. Secara umum, *coffea canephora* memiliki buah dengan ukuran 8 sampai dengan 16 mm.



Gambar 5. Ilustrasi penampang buah kopi

Sumber: (Panggabean, 2012)

1.6.2 Komposisi Kimia *Coffea Canephora*

Limbah kopi *Coffea Canephora* mengandung beberapa senyawa aktif yang berpotensi sebagai adsorben alami untuk mereduksi kadar logam berat seperti tembaga (Cu). Menurut Wardhana, dkk. (2019), komponen utama yang terkandung dalam *Coffea Canephora* yang sangat potensial dalam pemanfaatan reduksi zat logam adalah protein dan lignoselulosa, dimana komponen lignoselulosa tersusun atas:

1. Selulosa

Selulosa mengandung gugus fungsional –OH hidroksil yang berperan aktif dalam proses adsorpsi logam melalui interaksi ikatan hidrogen, sementara

2. Hemiselulosa

Hemiselulosa mengandung gugus fungsional –COOH yang berperan dalam adsorpsi zat logam berat melalui ikatan ionik.

3. Lignin

Lignin mengandung gugus fungsional –OH aromatik serta kaya akan gugus fenolik, metoksil, dan karbonil yang meningkatkan tingginya kemampuan lignin dalam mengikat zat logam seperti tembaga (Cu).

Adapun persentase komposisi kimia yang terkandung dalam *Coffea Canephora* dapat dilihat pada tabel sebagai berikut:

Tabel 1. Kandungan kimia *Coffea Canephora*

Senyawa Kimia	Persentase (%)
Air	8,47
Abu	5,60
Serat Kasar	32,38
Karbohidrat	76,83
Protein	7,99
Lignin	33,79
Hemiselulosa	6,34
Selulosa	15,38

Sumber: Wardhana, dkk., 2019

1.6.3 Logam Tembaga (Cu)

Tembaga (Cu) merupakan logam dengan berat atom sebesar 63,55 g/mol. Cu memiliki titik lebur pada 1083 °C dan titik didih pada 2310 °C, sementara jari-jari atomnya 1,173 Å dan jari-jari ion 0,96 Å. Dalam bentuk logam, Cu berwarna kemerahan, dengan sifat mudah regang dan mudah ditempa. Namun, tak jarang Cu juga ditemukan dalam bentuk berikatan dengan ion-ion lain, sehingga warnanya tidak selalu kemerahan seperti tembaga murni (Khairuddin, dkk., 2021). Logam Cu merupakan salah satu zat logam berat yang banyak dihasilkan oleh industri, terutama industri migas dimana Cu banyak digunakan sebagai katalis dalam proses desulfurisasi untuk mengubah senyawa sulfur menjadi tidak berbau. Selain logam Cu, terdapat jenis zat logam tembaga lain yang dapat terkandung dalam limbah cair industri migas. Kandungan beserta perbandingan dari air limbah industri migas dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. Perbandingan Kandungan Logam Berat

Perusahaan	Kandungan Logam Berat (mg/l)				
	Cu	Fe	Zn	Pb	Cr
Pertamina	0,10-3,35	0,10 - 3,30	0,01 - 2,50	0,004 - 1,45	0,02 - 1,15
Shell	0,10-3,30	0,10-2,55	0,01-1,10	0,001-1	0,01-1,10
Halliburton	0,25-3,45	0,20-2,50	0,15-3,30	0,10-0,25	0,10-2,30
Baker Hughes	0,20-4,10	0,002-1,30	0,001-0,30	0,035-1,30	0,005-1,50
Schlumberger	0,15-3,50	0,20-3,44	0,005-0,030	0,13-0,30	0,001-0,01

Sumber: Lawan dkk., 2023

Meluasnya penggunaan Cu diberbagai bidang industri, mengakibatkan resiko peningkatan kadar Cu di lingkungan. Proses produksi seperti penggunaan katalis yang mengandung logam Cu, akan menghasilkan limbah dengan kadar Cu yang tinggi pula (Elewati & Kandowanko, 2018). Logam Cu termasuk kedalam golongan logam berat yang bersifat toksik atau racun. Namun, logam Cu masih dapat digolongkan kedalam kategori logam berat yang bersifat esensial apabila dalam konsentrasi yang sangat kecil. Apabila logam Cu tersedia dalam konsentrasi yang tinggi, maka pengaruh dari tingginya tingkat toksisitas akan terlihat ketika logam Cu telah masuk ke dalam tubuh organisme dalam jumlah yang besar, atau ketika konsentrasi logam Cu yang masuk telah melebihi toleransi dari organisme tersebut (Indah & Safnowandi, 2020). Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah, ditetapkan bahwa ambang batas logam tembaga yang terkandung dalam air limbah tidak boleh melebihi 3 mg/l. Berikut dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 3. Baku Mutu Air Limbah

Parameter	Satuan	Golongan	
		I	II
Merkuri (Hg)	mg/L	0,002	0,005
Timbal (Pb)	mg/L	0,1	1
Kadmium (Cd)	mg/L	0,05	0,1
Kromium (Cr)	mg/L	0,5	1
Tembaga (Cu)	mg/L	2	3
Nikel (Ni)	mg/L	0,2	0,5
Seng (Zn)	mg/L	5	10

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah

Menurut Lawan dkk., (2023), limbah industri migas mengandung polutan logam Cu dengan rentang 1-4,5 mg/L. Industri migas yang tidak mengolah terlebih dahulu limbahnya dan langsung melakukan pembuangan limbah industri ke badan sungai dan laut, dapat menyebabkan lingkungan perairan mengalami paparan logam berat Cu. Hal ini dapat memberikan pengaruh buruk pada biota dan tumbuhan yang hidup dalam perairan tersebut. Biota yang terpapar logam berat Cu akan mengalami keterhambatan metabolisme yang diakibatkan oleh kerusakan dan penurunan kerja enzim.

Paparan logam berat Cu yang telah berakumulasi dalam tubuh biota akhirnya akan sampai terakumulasi pada manusia pula. Pada manusia, efek dari paparan logam Cu dalam jumlah tinggi dapat menyebabkan penyakit ginjal, hati, sakit kepala, anemia, dan dalam kasus tertentu dapat menyebabkan kematian. Untuk menghindari dan meminimalisir paparan zat logam berat tembaga (Cu) terhadap makhluk hidup, maka perlu dilakukan pengolahan limbah cair sebelum dibuang ke perairan, sehingga limbah cair tidak lagi bersifat toksik dan membahayakan. Dimana salah satu bentuk upayanya adalah dengan memanfaatkan salah satu teknik pengolahan air limbah adsorpsi (Indah & Safnowandi, 2020).

1.6.4 Adsorpsi

Salah satu metode yang dapat diterapkan dalam upaya penghilangan zat pencemar dari air adalah adsorpsi. Secara umum, adsorpsi adalah proses menempelnya ion, molekul,

atau partikel dari suatu zat yang selanjutnya disebut adsorbat, ke permukaan padatan atau cairan lain yang selanjutnya disebut adsorben. Dalam penjelasan lain, adsorpsi merupakan suatu proses dimana terambilnya substansi terlarut yang terkandung dalam larutan melalui suatu pemisahan yang sesuai (Syauqiah, dkk., 2011).

Menurut Widwastuti, dkk., (2019), dalam mekanismenya, proses adsorpsi dibedakan menjadi 2, yaitu:

1. Adsorpsi fisik (fisiosorpsi)

Adsorpsi fisik terjadi ketika gaya tarik-menarik molekul antara zat terlarut dengan adsorben lebih besar dibandingkan dengan gaya tarik-menarik zat terlarut dengan pelarut. Sehingga, proses teradsorpsinya zat terlarut hanya terjadi di atas permukaan adsorben. Ikatan yang terjadi pada proses ini sangat lemah, sehingga proses ini dapat berlangsung bolak-balik. Adsorpsi fisik dapat terjadi akibat adanya gaya *van der Waals*

2. Adsorpsi kimia (kemisorpsi)

Pada proses ini, terjadi reaksi kimia antara adsorbat terlarut dengan zat padat adsorben. Ikatan yang terjadi antara adsorben dengan adsorbat sangat erat, sehingga lebih sulit untuk dilepaskan dan tidak memungkinkan bagi proses ini untuk terjadi secara bolak-balik.

Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi adsorpsi menurut Hasyim, dkk., (2017) antara lain:

1. Waktu kontak

Waktu kontak merupakan berapa lama waktu yang diperlukan bagi adsorbat untuk melakukan proses difusi atau pencampuran dan penempelan terhadap adsorben.

2. Luas permukaan

Luas permukaan menjadi faktor penentu yang tak kalah penting dalam berlangsungnya proses adsorpsi. Dimana semakin luas permukaan adsorben yang tersedia, semakin banyak pula adsorbat yang terserap. Menyebabkan proses adsorpsi semakin selektif untuk mengetahui seberapa efektif adsorben dalam menyerap atau mereduksi adsorbat.

3. Kelarutan adsorbat

Ion, molekul, atau partikel yang terkandung dalam suatu larutan diperlukan untuk terlepas dari larutannya. Hal ini dikarenakan ion, molekul, dan partikel yang tidak terlarut adalah adsorbat yang kemudian menempel pada adsorben sehingga proses adsorpsi dapat terjadi.

4. Ukuran molekul

Besar kecilnya ukuran molekul adsorbat menjadi faktor penting dalam proses adsorpsi. Proses adsorpsi dapat dilihat keberhasilannya ketika molekul adsorbat telah diserap partikel adsorben, sehingga ukuran molekul menjadi bagian paling penting untuk ditinjau.

5. Temperatur

Pada temperatur atau suhu yang rendah (dingin), kecepatan dan jumlah molekul yang berhasil teradsorpsi menurun. Sebaliknya, pada temperatur atau suhu yang meningkat (pemanasan), akan mengaktifkan adsorben sehingga daya serap adsorben meningkat dan proses adsorpsi pun terjadi. Namun, apabila temperatur

atau suhu terlalu panas, dapat merusak kualitas adsorben, sehingga kemampuannya dalam menyerap adsorbat pun menurun. Menjadikan proses adsorpsi tidak efektif.

6. Derajat keasaman (pH)

Derajat keasaman (pH) berpengaruh dalam pembentukan ion yang terlarut dalam suatu larutan, serta muatan permukaan dari adsorben, dimana keduanya sangat penting dalam menentukan efektivitas proses adsorpsi.

7. Kecepatan pengadukan

Kecepatan pengadukan juga merupakan salah satu faktor penting yang perlu ditinjau dalam keberhasilan proses adsorpsi. Kecepatan pengadukan yang terlalu lambat mengakibatkan proses adsorpsi yang berlangsung lambat pula. Sebaliknya, kecepatan pengadukan yang berlangsung cepat dapat mempercepat proses adsorpsi. Yang perlu menjadi perhatian adalah apabila kecepatan pengadukan terlalu cepat, memungkinkan untuk merusak struktur adsorben, sehingga proses penyerapan adsorbat dalam adsorpsi tidak berlangsung secara optimal.

1.6.5 Adsorben

1.6.5.1 Pengertian Adsorben

Adsorben merupakan zat padat yang dapat menarik serta mengikat zat lain dalam bentuk ion, molekul, atau partikel lain (adsorbat) yang terkandung dalam suatu larutan untuk kemudian terikat di permukaannya melalui proses adsorpsi. Proses penyerapan adsorben berbeda dengan mekanisme penyerapan spons yang menyerap kedalam, melainkan adsorben hanya menarik adsorbat sampai pada permukaannya saja. Pada umumnya, adsorben terbentuk dari bahan-bahan yang memiliki pori besar, dimana proses adsorpsi akan berlangsung pada letak tertentu dalam dinding pori-pori adsorben (Rahmi & Sajidah, 2018).

1.6.5.2 Sifat-Sifat Adsorben

Menurut Rahmi & Sajidah (2018), adsorben dapat digolongkan menjadi beberapa jenis sesuai kemampuannya mengikat suatu zat, yaitu:

1. Adsorben polar

Adsorben polar merupakan adsorben yang memiliki daya adsorpsi yang jauh lebih besar terhadap zat yang mengandung senyawa anorganik berupa nitrat dan fosfat, serta senyawa organik berupa alkohol. Adapun zat ion logam yang dapat diikat oleh adsorben polar adalah timbal (Pb), seng (Zn), dan tembaga (Cu). Adsorben polar memiliki gugus fungsional polar, yaitu gugus yang memiliki perbedaan keelektronegatifan antar atom. Permukaan adsorben polar memiliki sifat hidrofilik, atau suka air, sehingga dapat berinteraksi kuat dengan zat yang juga berjenis polar. Contoh dari adsorben yang termasuk kedalam jenis polar adalah alumina aktif, silika gel, dan zeolite.

2. Adsorben non-polar

Adsorben non-polar merupakan adsorben yang tidak memiliki gugus fungsional bermuatan, sehingga cenderung bersifat hidrofobik (tidak suka air). Adsorben non-polar bekerja secara efektif dalam melakukan penyerapan senyawa non-polar melalui proses adsorpsi fisik atau interaksi gaya Van der Waals. Zat non-polar yang dapat diikan antara lain pestisida serta minyak dan lemak. Contoh dari adsorben non-polar adalah polietilen (PE) dan polipropilen (PP).

3. Adsorben alami (bioadsorben)

Adsorben alami atau bioadsorben merupakan adsorben yang menggunakan bahan sisa organik yang umumnya berasal dari tanaman sebagai bahan utama pembuatannya. Adsorben alami diproses untuk dimanfaatkan sebagai pereduksi zat pencemar seperti logam berat, pewarna, pestisida, dan senyawa berbahaya lainnya yang terkandung dalam zat terlarut seperti perairan maupun gas seperti udara.

1.6.5.3 Adsorben Karbon Aktif

Adsorben memiliki banyak macam dan jenisnya. Salah satu diantaranya yang paling banyak digunakan adalah adsorben dalam bentuk karbon aktif. Karbon aktif adalah karbon dengan struktur mikrokristalin. Artinya, karbon aktif memiliki susunan partikel yang terdiri dari kristal-kristal berukuran sangat kecil yang kemudian membentuk suatu padatan padat, namun tidak berstruktur tunggal seperti kristal berukuran besar pada umumnya (Kosim dkk., 2022). Karbon aktif juga bersifat amorphous, yang artinya acak dengan luas permukaan dalam sekitar 300 sampai 2000 m²/gr. Besarnya luas permukaan dalam karbon aktif menentukan kemampuannya dalam menyerap adsorbat dibandingkan dengan arang biasa (Esterlita & Herlina, 2015).



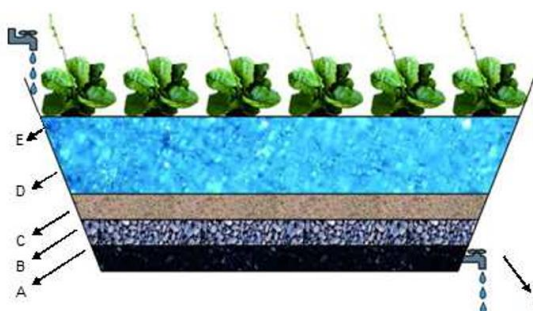
Gambar 6. Karbon aktif

Sumber: Winoto dkk., 2020

Menurut Winoto dkk., (2020), karbon aktif banyak digunakan dalam dunia industri sebagai pemanfaatan untuk menyerap dan mereduksi berbagai macam zat logam berat yang terkandung dalam larutan. Karbon aktif merupakan senyawa yang penyusun utamanya berupa karbon yang telah diolah dengan perlakuan khusus, sehingga memiliki porositas tinggi dan luas permukaan yang besar. Akibatnya, karbon aktif menjadi adsorben yang memiliki potensi tinggi dalam penyerapan zat pencemar yang terkandung di air limbah industri. Luas permukaan arang aktif adalah penentu keefektifannya dalam menyerap adsorbat, sehingga berbagai macam sifat permukaannya dapat diproduksi dengan menyesuaikan terhadap kebutuhan penggunaannya.

1.6.5.4 Pengaplikasian Adsorben

Adsorben dalam bentuk karbon aktif memiliki luas permukaan yang besar sehingga dapat menyerap kotoran dalam air. Salah satu contoh pengaplikasian adsorben adalah sebagai media pada pengolahan air limbah metode *constructed wetland*. *Constructed wetlands* adalah sistem rekayasa yang telah didesain dengan memanfaatkan proses alamiah yang melibatkan tumbuhan, tanah, dan mikroba yang saling berhubungan untuk membantu pengolahan limbah cair. Pada pengolahan air limbah metode *constructed wetland* digunakan tumbuhan yang memiliki keragaman akar, yaitu jenis tumbuhan air seperti metlati air. Hal ini dikarenakan setiap akar tumbuhan memiliki mikroba akar yang mengonsumsi eksudat tumbuhan (zat yang dikeluarkan oleh tumbuhan) untuk menyerap adsorbat. Untuk dapat menambah kemampuan tumbuhan dalam menyerap adsorbat, maka dikombinasikan dengan kemampuan adsorpsi dari karbon aktif. Pori-pori yang terdapat pada karbon aktif akan membantu menyerap adsorbat yang terkandung pada air limbah yang tidak dapat dilakukan sepenuhnya oleh tumbuhan (Setiyanto dkk., 2020).



Gambar 7. Desain *constructed wetlands* tipe *subsurface flow system*
A = karbon aktif, B = kerikil, C = pasir, D = air limbah, E = tanaman metlati air,
dan F = keran outlet air limbah.

Sumber: Setiyanto dkk., 2020

Selain pemanfaatan pengolahan air limbah metode *constructed wetland*, pengembangan teknologi *composite membrane adsorbent* berbasis biomassa menjadi salah satu pendekatan inovatif dalam meningkatkan efektivitas dan stabilitas sistem penyerapan logam berat, termasuk logam tembaga (Cu). Konsep ini mengombinasikan material adsorben aktif, seperti serbuk limbah kopi, dengan bahan polimer alami maupun sintetik, misalnya kitosan, polivinil alkohol (PVA), atau selulosa teroksidasi, untuk membentuk lapisan membran berpori yang memiliki kekuatan mekanik tinggi serta kemampuan selektif terhadap ion logam tertentu (Zhang dkk., 2023). Mekanismenya berlangsung melalui proses *diffusion-adsorption*, dimana ion Cu^{2+} dalam air limbah terdifusi menuju permukaan membran dan terikat pada gugus fungsional aktif dari adsorben biomassa yang terperangkap di dalam matriks polimer. Struktur komposit ini mampu memperlambat laju fouling, memperbesar luas permukaan kontak, serta mempertahankan efisiensi adsorpsi dalam siklus penggunaan berulang (Li dkk., 2022). Selain itu, integrasi adsorben ke dalam bentuk membran juga memudahkan pemisahan fase padat-cair setelah proses adsorpsi tanpa memerlukan filtrasi tambahan, sehingga menjadikannya teknologi yang lebih efisien dan ramah lingkungan dibandingkan

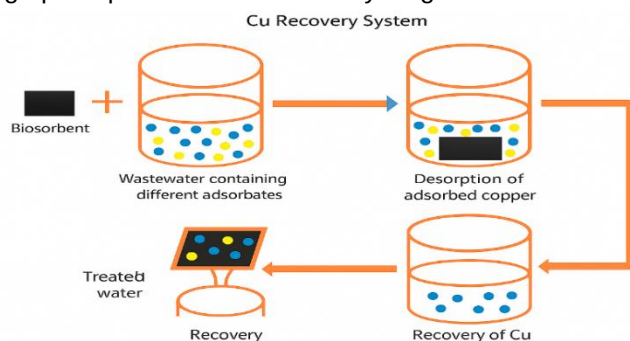
penggunaan adsorben bubuk konvensional (Nguyen dkk., 2023). Dengan demikian, *composite membrane adsorbent* dapat dipandang sebagai bentuk peningkatan dari adsorben tunggal, karena tidak mengubah fungsi utama material sebagai penyerap logam, tetapi memperbaiki karakteristik fungsional, kepraktisan, dan ketahanan strukturnya dalam sistem pengolahan air berkelanjutan.



Gambar 8. Mekanisme *composite membrant adsorbent*

Sumber: Elwardany dkk., 2023

Composite membrant adsorbent kemudian dapat dikembangkan kembali menjadi teknologi pemulihan zat logam berat (*heavy metal recovery*) yang ramah lingkungan dan dapat bernilai ekonomi. Prinsip utama dari teknologi ini adalah penggunaan bioadsorben yang kemudian diintegrasikan ke dalam sistem pemisahan berbasis komposit atau membran agar memungkinkan proses desorpsi dan pemulihan logam berlangsung lebih efisien. Pada mekanismenya, ion Cu^{2+} yang telah terikat pada permukaan adsorben dapat dilepaskan kembali melalui proses elusi menggunakan larutan desorben asam lemah seperti HCl, sehingga logam dapat dikumpulkan dalam bentuk larutan pekat yang kemudian direkristalisasi menjadi Cu murni (Wang dkk., 2022). Pendekatan ini tidak hanya menurunkan kadar Cu dalam limbah cair hingga di bawah ambang baku mutu, tetapi juga berkontribusi terhadap *circular economy* melalui daur ulang logam bernilai tinggi (Kong dkk., 2023). Dengan demikian, pengembangan inovasi teknologi ini menjadi strategi inovatif yang tidak hanya berfokus pada penghilangan logam berat, tetapi juga pada pemulihan sumber daya logam secara berkelanjutan.



Gambar 9. Mekanisme *heavy metal recovery system*

Sumber: Bayuo dkk., 2023

1.6.6 Aktivasi Adsorben

Sebelum dimanfaatkan untuk menyerap adsorbat melalui proses adsorpsi, perlu dilakukan proses aktivasi pada adsorben terlebih dahulu. Aktivasi adsorben dilakukan agar menghasilkan karbon aktif yang memiliki permukaan luas dan pori-pori yang besar, agar dapat menyerap zat adsorbat secara maksimal. Aktivasi pada adsorben dapat dilakukan melalui dua cara, yaitu aktivasi secara fisika dan aktivasi secara kimia.

Contoh perlakuan aktivasi adsorben secara fisika adalah dengan pemutusan ikatan karbon yang terkandung dalam senyawa organik melalui proses pemanasan pada suhu tinggi, CO₂ dan uap. Sementara aktivasi adsorben secara kimia dapat dilakukan dengan penambahan larutan yang mengandung senyawa hidroksida. Aktivator yang dapat digunakan untuk mengaktivasi adsorben memiliki berbagai macam, diantaranya seperti KOH, NaOH, ZnCl₂, dan H₃PO₄. Berdasarkan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Haziza dkk., (2024), aktivator H₃PO₄ dinilai sebagai aktivator yang dapat bekerja paling efektif dalam mereduksi zat ion logam berat dibandingkan KOH, NaOH, dan ZnCl₂. Hal ini dikarenakan H₃PO₄ memiliki suhu aktivasi yang rendah dengan waktu pengaktifan yang singkat, serta memiliki permukaan yang baik. Menurut Esterlita & Herlina, (2015), aktivator H₃PO₄ dapat menghasilkan karbon aktif yang memiliki mikropori maksimum pada kondisi operasi suhu < 450 °C dengan perbandingan persen berat antara aktivator dengan sampel sekitar 29 – 52%.

1.6.7 Karakteristik Adsorben

Karakteristik adsorben karbon aktif yang dinilai mengikuti peraturan SNI 06-3730-1995, yaitu:

1. Kadar air

Kadar air adalah persentase jumlah air yang terkandung dalam adsorben pada kondisi normal. Kandungan air yang tinggi dapat menurunkan efektivitas adsorpsi karena air akan bersaing dengan zat adsorbat dalam mengisi pori-pori adsorben. Karbon aktif memiliki sifat afinitas yang besar terhadap air. Artinya, karbon aktif memiliki kemampuan yang besar untuk menarik atau terikat dengan air. Penentuan kandungan kadar air yang terkandung dalam karbon aktif bertujuan untuk mengetahui sifat higroskopis karbon, yaitu kemampuan karbon aktif untuk menyerap uap air dari udara (Winoto dkk., 2020). Berdasarkan SNI 06-3730-1995, karbon aktif dikatakan memenuhi standar kualitas apabila kandungan kadar air dibawah batas maksimal yaitu 15%.

2. Kadar abu

Kadar abu merupakan jumlah residu anorganik yang tidak ikut terbakar pada proses karbonisasi adsorben. Abu adalah oksida-oksida logam yang terdiri dari mineral seperti silika, kalium, kalsium dan magnesium. Kadar abu yang terkandung dalam adsorben sangat berpengaruh terhadap kualitas adsorben itu sendiri, dikarenakan apabila kandungan kadar abu terlalu tinggi, akan menyebabkan terjadinya penyumbatan pada pori-pori adsorben, sehingga kemampuan adsorpsi akan menurun dan menjadi tidak efektif (Kosim dkk., 2022). Berdasarkan SNI 06-3730-1995, karbon aktif dikatakan memenuhi standar kualitas apabila kandungan kadar abu dibawah batas maksimal yaitu 10%.

3. Kadar volatil

Kadar volatil adalah sejumlah senyawa mudah menguap yang masih tertinggal dalam adsorben setelah proses karbonisasi. Senyawa ini dapat berbagai macam jenisnya seperti minyak, lemak, senyawa aromatik, atau komponen organik yang tidak terdekomposisi secara maksimal pada proses sebelumnya. Nilai kadar volatil yang terlalu tinggi menunjukkan bahwa proses karbonisasi tidak berlangsung secara optimal, sementara apabila nilai kadar volatil terlalu rendah dapat berarti proses karbonisasi terlalu banyak membakar adsorben sehingga struktur pori menjadi rusak dan proses adsorpsi tidak bekerja optimal (Winoto dkk., 2020). Berdasarkan SNI 06-3730-1995, karbon aktif dikatakan memenuhi standar kualitas apabila kandungan kadar volatil dibawah batas maksimal yaitu 15%.

4. Kadar karbon terikat

Karbon terikat adalah bagian dari karbon yang tersisa setelah kadar air, abu, dan volatil dihilangkan. Kadar karbon terikat membentuk kerangka struktur pori mikrokristalin yang berfungsi sebagai situs aktif dalam penyerapan zat adsorbat, sehingga kadar karbon terikat menjadi indikator utama untuk menentukan seberapa efektif kerja adsorben dalam menyerap zat adsorbat. Semakin tinggi nilai karbon terikat, artinya semakin efektif proses adsorpsi dari adsorben tersebut. Nilai karbon terikat yang tinggi juga menunjukkan bahwa proses karbonisasi berjalan efisien, karena menghasilkan struktur karbon yang berjumlah banyak dengan sifat stabil dan kuat (Winoto dkk., 2020). Berdasarkan SNI 06-3730-1995, karbon aktif dikatakan memenuhi standar kualitas apabila nilai kadar karbon terikat diatas batas minimal yaitu 65%.

5. Nilai rendemen

Nilai rendemen adalah persentasi hasil karbon aktif yang diperoleh dari berat awal bahan baku setelah melalui proses karbonisasi, yaitu proses pemanasan untuk menyisakan struktur karbon dari bahan baku adsorben serta proses aktivasi adsorben baik secara fisika maupun kimia. Nilai rendemen akan menjadi parameter efisiensi dari proses konversi bahan baku menjadi produk akhir. Adapun beberapa faktor yang akan mempengaruhi nilai rendemen antara lain adalah jenis bahan baku yang digunakan, kandungan kadar air, suhu dan lama waktu karbonisasi, serta jenis aktivator yang digunakan untuk proses aktivasi adsorben.

Adapun parameter yang harus diperhatikan untuk dapat memenuhi standar kualitas adsorben karbon aktif sesuai dengan peraturan SNI 06-3730-1995 dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

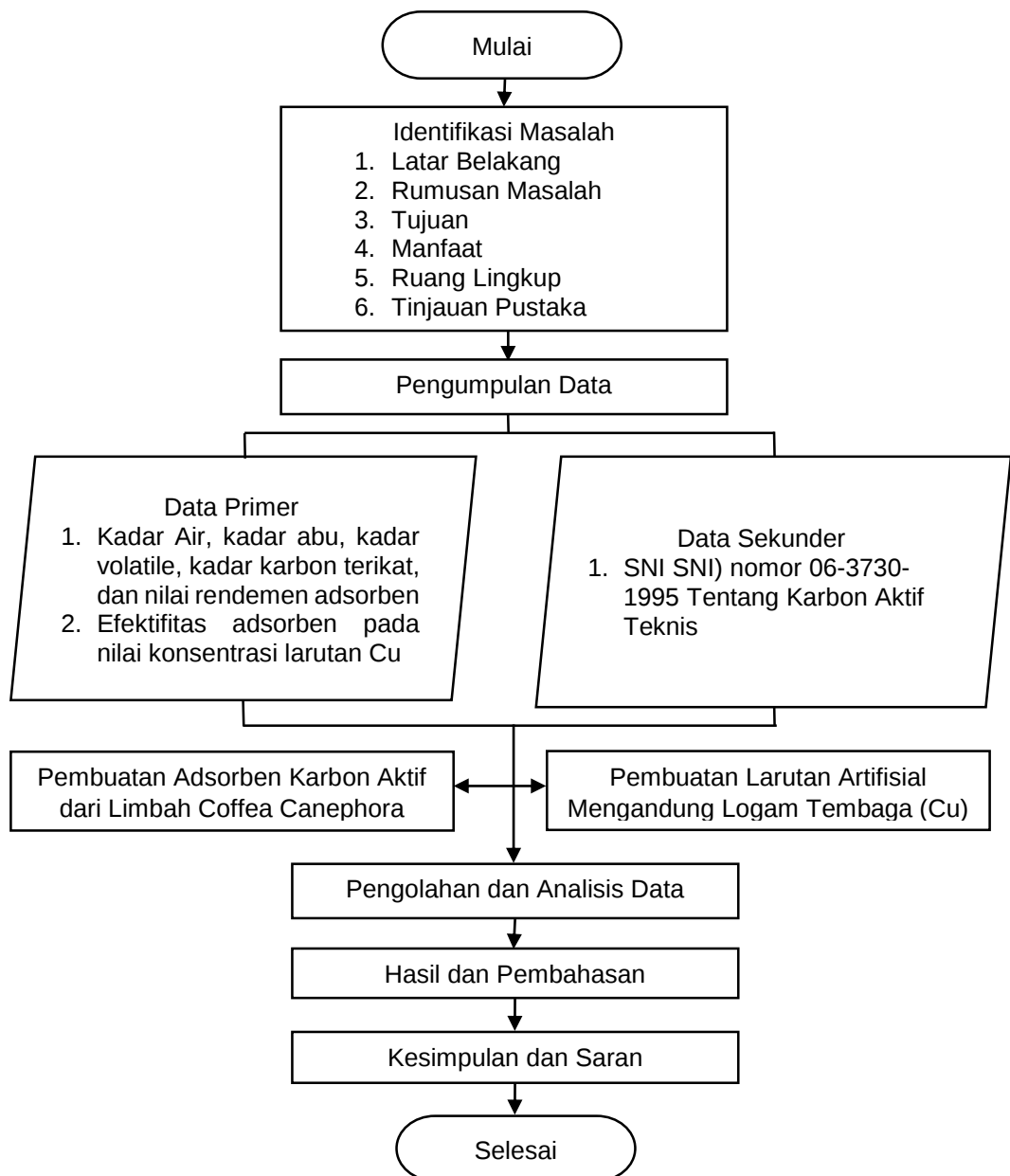
Tabel 3. Standar kualitas karbon aktif

Parameter	Standar Kualitas (%)	Keterangan
Kadar Air	15	Maksimal
Kadar Abu	10	Maksimal
Kadar Volatil	25	Maksimal
Kadar Karbon Terikat	65	Minimal

Sumber: SNI 06-3730-1995

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Rancangan Penelitian



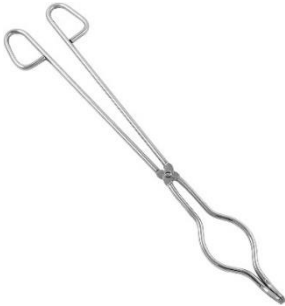
Gambar 10. Bagan alir penelitian

2.3 Alat dan Bahan

Berikut ini adalah alat dan bahan yang digunakan selama berlangsungnya kegiatan penelitian.

Tabel 4. Alat dan bahan yang digunakan

No	Nama Alat/Bahan	Gambar	Kegunaan
1.	<i>Coffea Canephora</i> (Green Bean)		Bahan baku utama dalam pembuatan adsorben karbon aktif
2.	<i>Coffea Canephora</i> (Black Bean)		Bahan baku utama dalam pembuatan adsorben karbon aktif
3.	Larutan $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$		Bahan baku pembuatan larutan Cu 300 ppm untuk proses adsorpsi
4.	Kontainer Plastik		Sebagai wadah untuk menampung sampel karbon aktif
5.	AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer)		Untuk mengukur konsentrasi Cu yang berhasil tereduksi adsorben

No	Nama Alat/Bahan	Gambar	Kegunaan
6.	Furnace		Digunakan untuk proses karbonisasi bahan baku adsorben
7.	Vacuum pump		Digunakan untuk proses penyaringan setelah aktivasi karbon aktif
8.	Penjepit		Untuk menjepit cawan sebelum dimasukkan ke furnace
9.	Loyang		Sebagai wadah untuk menampung sampel karbon aktif sebelum dimasukkan ke oven

No	Nama Alat/Bahan	Gambar	Kegunaan
10.	Jar Test	 A laboratory jar test apparatus with four glass jars containing yellow liquid, mounted on a metal frame with a control panel on the right.	Digunakan untuk mencampurkan aktivator dengan adsorben melalui proses pengadukan
11.	Gelas Piala	 A clear glass beaker with a 100 ml capacity, marked with volume increments from 20 to 100.	Sebagai wadah larutan dalam proses pembuatan larutan aktivasi
12.	Alumunium Foil	 A roll of aluminum foil with a portion unrolled, showing its reflective surface.	Sebagai alas dan untuk menutup larutan yang telah dibuat
13.	Oven	 A white laboratory oven with its door open, revealing internal shelves and a digital control panel on top.	Untuk mengeringkan adsorben setelah proses aktivasi serta melakukan uji karakteristik adsorben
14.	Cawan Porselen	 A white, shallow porcelain dish or bowl.	Sebagai wadah adsorben pada saat proses karbonisasi

No	Nama Alat/Bahan	Gambar	Kegunaan
15.	Ayakan 100 mesh		Menyeragamkan ukuran sampel yang telah dihaluskan.
16.	Mortal dan Alu		Menghancurkan sampel sehingga diperoleh partikel yang lebih kecil.
17.	Batang Pengaduk		Untuk melakukan pencampuran suatu larutan dengan cara pengadukan
18.	Sendok Tanduk		Untuk memindahkan sampel karbon aktif pada proses penelitian
19.	Neraca Digital		Melakukan penimbangan berat sampel dan berat awal dari alat yang digunakan

No	Nama Alat/Bahan	Gambar	Kegunaan
20.	Gelas Ukur		Untuk mengetahui volume dalam pembuatan larutan aktivasi dan tembaga
21.	Pipet		Untuk memindahkan larutan dari suatu tempat ke tempat lain
22.	pH meter		Untuk mengetahui pH suatu larutan
23.	Labu Ukur		Sebagai wadah untuk mengencerkan larutan sampel uji dan aktivator
24.	Kertas Saring		Memisahkan fraksi padat dengan fraksi cair

No	Nama Alat/Bahan	Gambar	Kegunaan
25.	Larutan H_3PO_4		Bahan untuk mengaktivasi adsorben karbon aktif
26.	Aquades		Bahan untuk menetralkan dan mensterilkan.

Sumber: Perencanaan Penulis, 2025

2.4 Metode Pengumpulan Data

2.4.1 Data Primer

Data primer adalah data yang diperoleh langsung dari sumbernya selama proses penelitian dilakukan. Dalam penelitian ini, beberapa data yang didapatkan secara langsung meliputi:

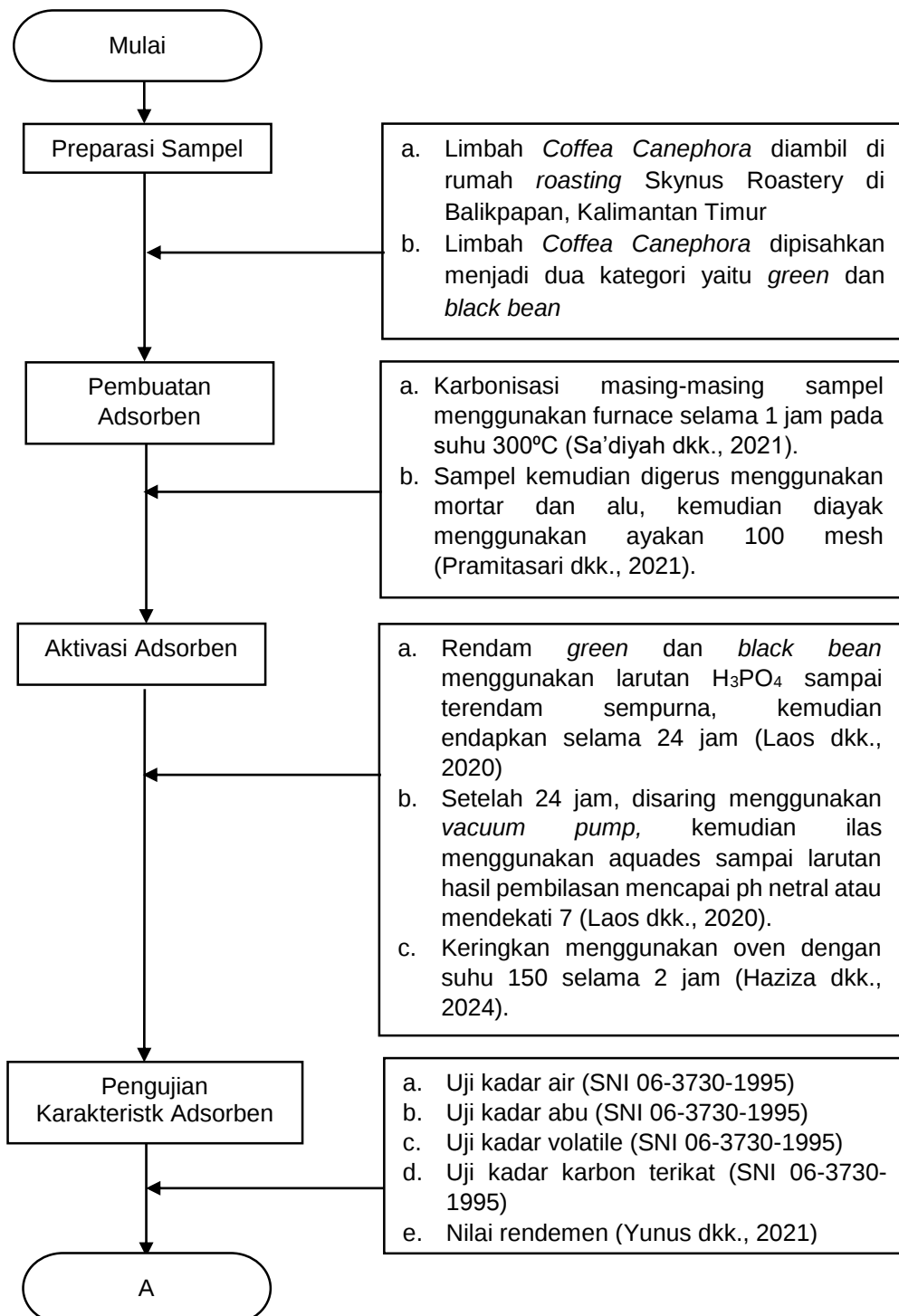
- Data hasil pengujian nilai kadar air, kadar abu, kadar volatil, nilai karbon terikat. Serta nilai rendemen dari adsorben karbon aktif dari limbah *coffea canephora* dalam bentuk *green* dan *black bean*.
- Data hasil perbandingan efektifitas adsorben karbon aktif antara limbah *coffea canephora* dalam bentuk *green* dengan *black bean* pada konsentrasi larutan artifisial tembaga (Cu).

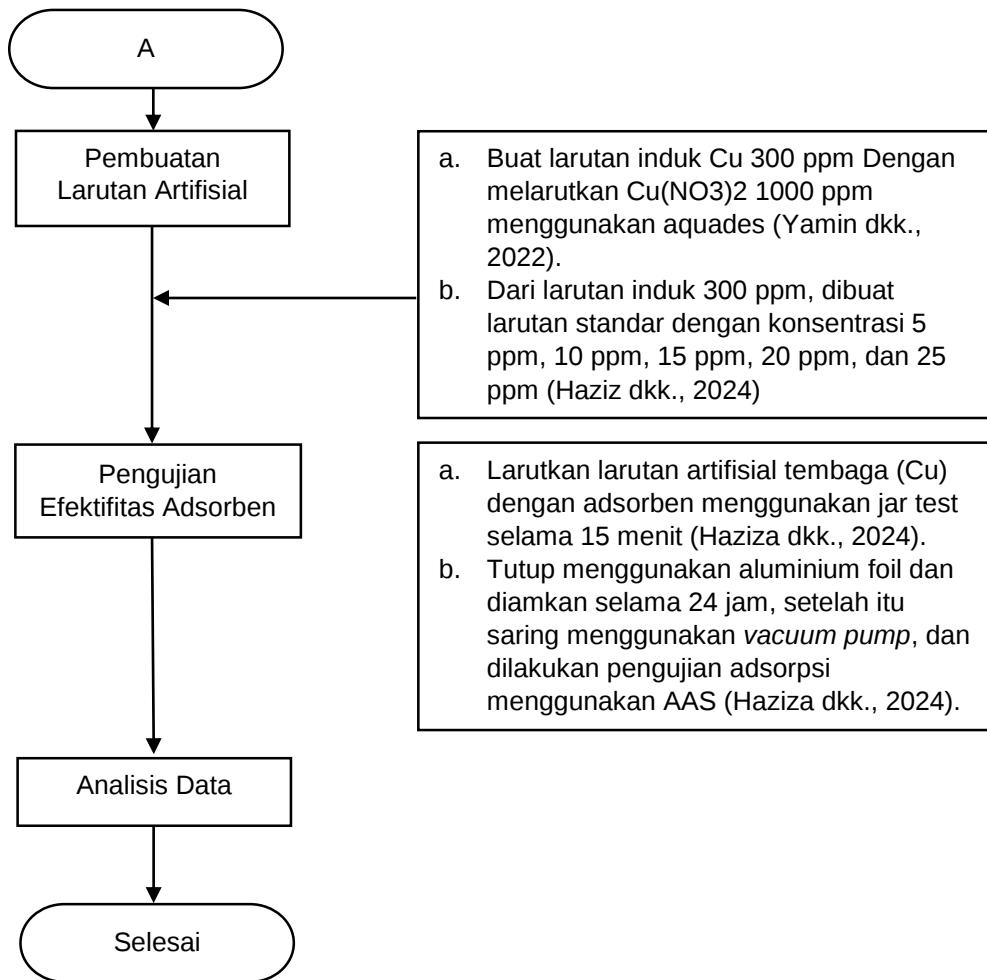
2.4.2 Data Sekunder

Data sekunder adalah data yang perolehannya secara tidak langsung, melainkan menggunakan informasi yang sudah ada sebelumnya. Dalam penelitian ini, data sekunder yang diperoleh berupa peraturan Standar Nasional Indonesia (SNI) nomor 06-3730-1995 tentang Karbon Aktif Teknis yang digunakan sebagai acuan standar kualitas adsorben karbon aktif limbah *coffea canephora* dan sebagai pembanding antara jenis limbah *green* dengan *black bean*.

2.5 Tahapan Penelitian

Berikut merupakan tahapan penelitian pembuatan adsorben karbon aktif dari limbah *coffea canephora*





Gambar 12. Bagan alir pembuatan adsorben karbon aktif

2.5.1 Analisis Karakteristik Adsorben

Standar kualitas adsorben karbon aktif mengacu pada peraturan SNI 06-3730-1995 tentang Karbon Aktif Teknis. Berikut merupakan cara pengujian serta perhitungan dari beberapa karakteristik adsorben

1. Kadar Air

Kadar air ditentukan dengan cara pengeringan di dalam oven. Sebanyak 2 gram karbon aktif ditempatkan di dalam cawan aluminium yang telah diketahui bobotnya, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 1050C hingga bobot konstan. Selanjutnya contoh didinginkan di dalam desikator selama 15 menit sebelum ditimbang beratnya. Batas konsentasi kadar air yang terkandung dalam karbon aktif menurut SNI 06-3730-1995 adalah sebesar 15%. Kadar air dapat dihitung dengan persamaan berikut (Laos & Selan, 2016):

$$Kadar\ Air = \frac{a-b}{a} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana:

a = massa awal karbon aktif (g)

b = massa akhir karbon aktif (g)

2. Kadar Abu

Untuk uji kadar abu, sebanyak 2 gram arang aktif dimasukkan dalam cawan yang telah diketahui bobotnya, kemudian di furnace pada suhu 4000C hingga seluruh sampel menjadi abu, kemudian didinginkan dalam desikator hingga suhu konstan lalu ditimbang. Kadar abu karbon dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Laos & Selan, 2016)

$$Kadar\ Abu = \frac{b}{a} \times 100\% \quad (2)$$

Dimana:

a = massa awal karbon aktif (g)

b = massa akhir karbon aktif (g)

3. Kadar Volatil

Sebanyak 1 g sampel dimasukkan ke dalam cawan porselen yang telah diketahui bobot keringnya. Selanjutnya sampel dipanaskan dalam furnice 950 °C selama 10 menit, kemudian didinginkan dalam eksikator dan ditimbang. Cawan ditutup serapat mungkin. Perhitungan kadar zat volatil menggunakan persamaan berikut ini (Todingbua dkk., 2023).

$$Kadar\ Volatil = \frac{a-b}{a} \times 100\% \quad (3)$$

Dimana:

a = massa awal karbon aktif bebas kadar air (g)

b = massa akhir karbon aktif (g)

4. Kadar Karbon Terikat

Karbon dalam arang adalah zat yang terdapat pada fraksi padat hasil pirolisis, selain abu (zat anorganik) dan zat volatil yang masih terdapat pada pori-pori arang. Perhitungan kadar karbon terikat menggunakan persamaan berikut ini (Todingbua dkk., 2023).

$$Kadar\ Karbon\ Terikat = 100\% - (kadar\ air + kadar\ abu + kadar\ volatil) \quad (4)$$

5. Nilai Rendemen

Bahan baku sebelum dipirolisis dan bahan baku yang telah jadi diukur massanya masing – masing dan dihitung rendemennya dengan persamaan berikut (Esterlita & Herlina, 2015).

$$Nilai\ Rendemen = \frac{berat\ adsorben}{berat\ bahan\ baku} \times 100\% \quad (5)$$

2.5.2 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini ditentukan variable bebas, variable terikat dan variable control. Dimana variable bebas untuk waktu kontak adalah 6 jam, 12 jam, dan 24 jam, dan variasi massa adsorben adalah 2 gram, 4 gram, dan 6 gram. Penelitian dilakukan untuk melihat kemampuan adsorpsi yang kemudian ditentukan dalam variable terikat, dimana akan dihitung efektivitas adsorpsi dalam satuan persentase, dan kapasitas adsorpsi dalam

satuan mg/g. Adapun variable control, yang merupakan kondisi yang dijaga konstan meliputi konsentrasi awal Cu 300 ppm, volume 50 mL, kecepatan pengadukan 240 rpm, ukuran partikel melalui ayakan 100 mesh, serta prosedur aktivasi H_3PO_4 selama 24 jam yang seragam. Berikut merupakan tabel variable penelitian yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 5. Variabel Penelitian

Jenis Variabel	Variabel	Nilai
Variabel Bebas	Massa Adsorben	2 gram
		4 gram
		6 gram
	Waktu Kontak	6 jam
		12 jam
		24 jam
Variabel Terikat	Efektivitas Adsorpsi	%
	Kapasitas Adsorpsi	Mg/g
Variabel Kontrol	Konsentrasi Awal	300 ppm
	Volume Larutan	50 ml
	Waktu Aktivasi	24 jam
	Kecepatan Pengadukan	240 rpm
	Ukuran Partikel	Ayakan 100 mesh

Sumber: Perencanaan Penulis, 2025

2.5.3 Pembuatan Larutan Artifisial Logam Berat Tembaga (Cu)

Untuk melakukan pengujian efektivitas adsorben, perlu dibuat larutan artifisial yang mengandung logam berat tembaga (Cu) terlebih dahulu. Bahan yang digunakan dalam pembuatan larutan artifisial adalah larutan $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 100%. Konsentrasi tembaga (Cu) yang akan diuji dalam penelitian ini adalah 300 ppm, sehingga untuk membuatnya perlu dilakukan pengenceran terlebih dahulu dengan cara memipet 0,5 ml larutan $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 100% ke dalam labu ukur 500 ml, kemudian diencerkan menggunakan aquades sampai tanda batas kemudian dihomogenkan. Kemudian untuk membuat larutan standar, maka perlu dilakukan pengenceran dari larutan Cu 300 ppm. Dalam penelitian ini digunakan 5 larutan standar dengan konsentrasi yang berbeda-beda, yaitu 5 ppm, 10 ppm, 15 ppm, 20 ppm, dan 25 ppm. Dalam pembuatan larutan standar, maka larutan Cu 300 ppm yang diencerkan berturut-turut adalah 1,7 ml, 3,3 ml, 5 ml, 6,7 ml dan 8,3 ml yang diencerkan menggunakan aquades pada labu ukur 100 ml sampai tanda batas kemudian dihomogenkan.

2.5.4 Pengujian Efektivitas Adsorben pada Larutan Artifisial Cu

Pengujian efektivitas adsorben *coffea canephora* dalam bentuk *green* dan *black bean* dilakukan dengan beberapa tahap, yaitu:

- Siapkan masing-masing adsorben green dan black bean dengan variasi massa 2 gram, 4 gram, dan 6 gram ke dalam gelas piala, kemudian tambahkan larutan artifisial Cu 300 ppm sebanyak 50 ml ke dalam masing-masing gelas piala.
- Dilakukan pengadukan menggunakan jar test selama 15 menit. Kemudian tutup gelas piala menggunakan alumunium foil dan diamkan selama 24 jam.

- c. Setelah 24 jam, lakukan penyaringan menggunakan *vacuum pump* untuk memisahkan adsorben dengan larutan artifisial mengandung Cu yang kemudian akan diuji menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS).

2.6 Analisis Data

2.6.1 Persentase Reduksi

Untuk mengetahui tingkat efisiensi dari kadar logam berat Cu yang berhasil tereduksi oleh adsorben *coffea canephora* dapat diketahui dengan menghitung nilai *influen* dan *effluen* dari hasil pengujian. Berikut merupakan rumus persentase reduksi logam berat Cu (Anggriani dkk., 2021).

$$Ef(\%) = \frac{c_o - c_t}{c_1} \times 100\%$$

Dimana:

- Ef = Persentase Reduksi (%)
- Co = Konsentrasi Cu sebelum perlakuan (mg/l)
- Ct = Konsentrasi Cu setelah perlakuan (mg/l)

2.6.2 Kapasitas Adsorpsi

Adapun untuk mengetahui kapasitas adsorpsi dari adsorben *coffea canephora* dapat dilihat dengan melakukan perhitungan menggunakan rumus sebagai berikut (Anggriani dkk., 2021).

$$Q_e = \frac{(c_o - c_t) \times v}{w}$$

Dimana:

- Qe = Kapasitas adsorpsi (mg/g)
- Co = Konsentrasi awal (mg/l)
- Ct = Konsentrasi akhir (mg/l)
- v = Volume larutan yang digunakan (L)
- w = Massa adsorben (g)