

**EFEKTIVITAS ZEOLIT DAN KARBON AKTIF DALAM PENURUNAN
KADAR FE DAN MN AIR TANAH MENGGUNAKAN KOLOM ADSORPSI**

**LULA MARCHSYANDA ADIPUTRI
D131 20 1061**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

**EFEKTIVITAS ZEOLIT DAN KARBON AKTIF DALAM PENURUNAN
KADAR FE DAN MN AIR TANAH MENGGUNAKAN KOLOM ADSORPSI**

LULA MARCHSYANDA ADIPUTRI

D131201061

Skripsi

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana

Program Studi Teknik Lingkungan

pada

**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

SKRIPSI

PEMANFAATAN ZEOLIT DAN KARBON AKTIF DALAM PENURUNAN KADAR FE DAN MN AIR TANAH MENGGUNAKAN KOLOM ADSORPSI

LULA MARCHSYANDA ADIPUTRI
D131201061

Skripsi,

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Sarjana Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada 26 November 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan
pada



Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Makassar

Mengesahkan:

Mengetahui:

Pembimbing tugas akhir,

Ketua Departemen Teknik Lingkungan,



Dr. Ir. Roslinda Ibrahim, S.P., M.T.
NIP. 197506232015042001



Dr.Eng. Ir. Muralia Hustim, S.T., M.T., IPM., AER.
NIP. 197204242000122001

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul **"Efektivitas Zeolit dan Karbon Aktif Dalam Penurunan Kadar Fe dan Mn Air Tanah Menggunakan Kolom Adsorpsi"** adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing (Dr. Ir. Roslinda Ibrahim, S.P., M.T.). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 26 November 2024



Lula Marchsyanda Adiputri
NIM D131201061

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas berkat rahmat dan karunia-Nya penulis bisa menyelesaikan dan menyusun tugas akhir dengan judul “Efektivitas Zeolit dan Karbon Aktif Dalam Penurunan Kadar Fe dan Mn Air Tanah Menggunakan Kolom Adsorpsi”. Penyusunan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak.

Penelitian yang dilakukan oleh penulis ini dapat terlaksanakan dengan baik dan dapat diselesaikan dalam bentuk tugas akhir berupa skripsi ini atas bimbingan dan arahan dari Ibu Dr. Ir. Roslinda Ibrahim, S.P., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya. Kemudian tak lepas juga ucapan terima kasih kepada Bapak maupun Ibu dosen dan staf Departemen Teknik Lingkungan yang juga telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini baik berupa penyampaian diskusi dan pemenuhan dokumen berkas yang diperlukan.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dan mengarahkan dalam menentukan judul serta menemani dalam setiap pengambilan sampel dan pengujian di lokasi. Selain itu juga kepada seluruh teman-teman yang menjadi penyokong fisik maupun mental penulis selama penyusunan tugas akhir ini, kepada Dina, Farah, Indira, Nobe, Pandan, Puta, dan Tita yang telah mewarnai hari-hari sejak SMP. Tak luput pula teman-teman Teknik Lingkungan 2020 terutama Fitri yang menemani dan membersamai penulis mulai dari awal perkuliahan, Rifdan yang telah banyak membantu dalam penyelesaian tugas akhir, begitu pula Yani, Wara, Dinda, Ikka, Pute, Naya, Nisa, dan Yo, yang bersama menemani huru-hara perkuliahan, juga Jon yang menempuh perjalanan yang sama dengan penulis sejak jenjang SMP, SMA, hingga perkuliahan, serta teman-teman Asisten Laboratorium Kualitas Air dan keluarga water yang menjadi tempat berdiskusi bersama di konsentrasi air.

Terakhir dan tak terlupakan, ucapan terima kasih kepada keluarga tercinta, Ayah Ardhi Rahim, Mama Arni Sambouw, Kakak Lulu, Leli, Ledy, Abang Al, dan Adek Lilo, yang selalu memberikan doa, dukungan, kasih sayang, dan dorongan yang tiada henti. Tanpa doa dan dukungan kalian, penulis tidak akan bisa mencapai tahap akhir perkuliahan dan menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis,

Lula Marchsyanda Adiputri

ABSTRAK

LULA MARCHSYANDA ADIPUTRI. *Efektivitas Zeolit dan Karbon Aktif Dalam Penurunan Kadar Fe dan Mn Air Tanah Menggunakan Kolom Adsorpsi* (dibimbing oleh Roslinda Ibrahim)

Latar Belakang. Kebutuhan masyarakat Indonesia akan air bersih semakin meningkat seiring dengan perkembangan zaman. Kuantitasnya yang besar menjadikan air tanah menjadi salah satu sumber air bersih utama bagi masyarakat. Sayangnya hal ini berkontradiksi dengan kualitasnya yang tidak selalu baik. Sebelum digunakan, air bersih harus memenuhi syarat-syarat kualitas secara fisika, kimia, dan biologi yang diatur dalam PERMENKES No. 2 Tahun 2023, di antaranya adalah parameter besi (Fe) dan mangan (Mn). Kadar besi (Fe) dan mangan (Mn) yang terlalu tinggi dalam air bisa menghasilkan dampak negatif yang merugikan. Air yang mengandung kadar logam seperti besi (Fe) dan mangan (Mn) dapat diolah menggunakan metode kolom adsorpsi dengan media zeolit dan karbon aktif. **Tujuan.** Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik air tanah, menganalisis pengaruh dan efisiensi jenis media zeolit dan karbon aktif serta kombinasi zeolit-karbon aktif sebagai adsorben dan waktu adsorpsi dalam penurunan kadar besi (Fe) dan mangan (Mn) pada air tanah. **Metode.** Penelitian ini menggunakan jenis media zeolit, karbon aktif, serta kombinasi zeolit-karbon aktif. Adapun waktu adsorpsi yang digunakan adalah 15 menit, 30 menit, dan 45 menit. **Hasil.** Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik air tanah memiliki kadar Fe sebesar 14,51 mg/l dan Mn sebesar <0,042 mg/l. Variasi jenis media dan waktu adsorpsi memiliki pengaruh terhadap penurunan kadar Fe dan Mn pada air tanah. Jenis media yang paling baik dalam penurunan kadar logam adalah zeolit, sedangkan waktu adsorpsi terbaik adalah 45 menit. Variasi jenis media dan waktu adsorpsi menghasilkan efisiensi penurunan kontaminan yang berbeda. Jenis media dengan efisiensi tertinggi dalam menurunkan kadar Fe adalah variasi jenis media zeolit dengan waktu 45 menit sebesar 99%. Didapatkan efisiensi variasi jenis media dan waktu adsorpsi dalam menurunkan kadar Mn yang stabil sebesar >36%.

Kata Kunci: Air Tanah, Zeolit, Karbon Aktif, Kolom Adsorpsi

ABSTRACT

LULA MARCHSYANDA ADIPUTRI. *Effectiveness of Zeolite and Activated Carbon in Reducing Fe and Mn Levels in Groundwater Using Adsorption Columns* (supervised by Roslinda Ibrahim)

Background. The need for clean water in Indonesia is increasing along with the times. Its large quantity makes groundwater one of the main sources of clean water for the community. Unfortunately, this contradicts its quality which is not always good. Before being used, clean water must meet the physical, chemical, and biological quality requirements regulated in PERMENKES No. 2 of 2023, including the parameters of iron (Fe) and manganese (Mn). Levels of iron (Fe) and manganese (Mn) that are too high in water can have negative detrimental impacts. Water containing metal levels such as iron (Fe) and manganese (Mn) can be processed using the adsorption column method with zeolite and activated carbon media.

Objective. This study aims to determine the characteristics of groundwater, analyze the influence and efficiency of the types of zeolite and activated carbon media and the combination of zeolite-activated carbon as adsorbents and adsorption time in reducing iron (Fe) and manganese (Mn) levels in groundwater. **Method.** This study used zeolite, activated carbon, and zeolite-activated carbon media types. The adsorption times used were 15 minutes, 30 minutes, and 45 minutes. **Result.** The results showed that the characteristics of groundwater had Fe levels of 14,51 mg/l and Mn of <0,042 mg/l. Variations in media types and adsorption time have an effect on reducing Fe and Mn levels in groundwater. The best media type in reducing metal levels is zeolite, while the best adsorption time is 45 minutes. Variations in media types and adsorption times produce different contaminant reduction efficiencies. The type of media with the highest efficiency in reducing Fe levels is a variation of the zeolite media type with a time of 45 minutes of 99%. The efficiency of variations in media types and adsorption times in reducing stable Mn levels was obtained by >36%.

Keywords: Groundwater, Zeolite, Activated Carbon, Adsorption Column

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN PENGAJUAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA.....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
BAB I PENDAHULUAN	13
1.1 Latar Belakang	13
1.2 Rumusan Masalah.....	15
1.3 Tujuan Penelitian.....	15
1.4 Manfaat Penelitian.....	16
1.5 Ruang Lingkup	16
1.6 Teori	16
BAB II METODE PENELITIAN	28
2.1 Lokasi Penelitian	28
2.2 Variabel Penelitian.....	28
2.3 Populasi dan Sampel	30
2.4 Alat dan Bahan Uji.....	30
2.5 Teknik Pengumpulan Data	31
2.6 Teknik Analisis Data	33
2.7 Diagram Alir Penelitian	35
BAB III ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	37
3.1 Karakteristik Air Tanah	37
3.2 Pengaruh Variasi Jenis Media dan Waktu Adsorpsi	39
3.3 Efisiensi Variasi Jenis Media dan Waktu Adsorpsi.....	46
BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN.....	58

4.1 Kesimpulan.....	58
4.2 Saran	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN	Error! Bookmark not defined.

DAFTAR TABEL

Nomor urut	Halaman
1. Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan Air untuk Keperluan Higiene dan Sanitasi	19
2. Matriks penelitian	29
3. Metode pengujian	33
4. Karakteristik air tanah Kampus Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.....	37
5. Karakteristik air tanah Gedung Sipil.....	37
6. Hasil pengujian Fe	39
7. Uji normalitas penurunan kadar Fe.....	40
8. Uji-t penurunan kadar Fe	41
9. Uji-F penurunan kadar Fe	42
10. Hasil pengujian Mn	45
11. Efisiensi jenis media dan waktu adsorpsi terhadap penurunan Fe.....	47
12. Nilai K_{TH} dan Q_0 berdasarkan plot model Thomas.....	51
13. Prediksi C_e/C_0 berdasarkan Model Thomas	51
14. Karakteristik media adsorben	54
15. Efisiensi jenis media dan waktu adsorpsi terhadap penurunan Mn	55

DAFTAR GAMBAR

Nomor Urut	Halaman
1. Lokasi penelitian	28
2. Perbandingan konsentrasi akhir Fe dengan baku mutu	43
3. Plot model thomas adsorpsi logam Fe.....	50
4. Kurva breakthrough adsorpsi logam Fe.....	53
5. Efisiensi jenis media dan waktu adsorpsi terhadap penurunan kadar Fe.....	48
6. Efisiensi jenis media dan waktu terhadap penurunan kadar Mn.....	56

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor Urut	Halaman
1. Peraturan Menteri Kesehatan No.2 Tahun 2023	64
2. SNI 06-4138-1996	66
3. SNI 06-4822-1998	71
4. Hasil uji laboratorium	75
5. Desain reaktor	77
6. Perhitungan excel	80
7. Uji statistik.....	84
8. Dokumentasi	85

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan masyarakat Indonesia akan air bersih semakin meningkat seiring dengan perkembangan zaman. Salah satu sumber air yang paling banyak dibutuhkan dan memasok kebutuhan air masyarakat adalah air tanah. Berdasarkan SNI 6989.58-2008 tentang Metoda Pengambilan Contoh Air Tanah, air tanah merupakan air yang terdapat dalam lapisan tanah atau batuan di bawah air permukaan tanah, antara lain sumur bor, sumur gali dan sumur pantek. Kuantitasnya yang besar menjadikan air tanah menjadi salah satu sumber air bersih utama bagi masyarakat. Sayangnya hal ini berkontradiksi dengan kualitasnya yang tidak selalu baik. Air tanah adalah salah satu sumber air bersih yang banyak dimanfaatkan oleh masyarakat di Sulawesi Selatan, termasuk warga di Kelurahan Borongloe, Kecamatan Bontomarannu, Kabupaten Gowa. Namun, penggunaan air tanah sering kali menemui kendala karena kualitas airnya belum memenuhi standar yang ditetapkan, sehingga berpotensi menimbulkan masalah kesehatan, baik secara langsung maupun tidak langsung (Ibrahim, 2022).

Aliran air tanah berperan sebagai perantara geologi yang secara terus-menerus mempengaruhi unsur-unsur kimia di lingkungan sekitarnya di dalam tanah. Lapisan tanah yang dilewati air mengandung unsur-unsur kimia tertentu, seperti senyawa besi dan mangan. Besi (Fe) dan Mangan (Mn) adalah elemen yang banyak ditemukan di batuan dan hampir di setiap tempat di bumi, termasuk semua lapisan geologi dan badan air. Kandungan unsur kimia dalam air sangat bergantung pada formasi geologi tempat air berada dan formasi geologi yang dilewatinya. Sebagai contoh, jika air mengalir melalui batuan yang mengandung besi, air tersebut akan mengandung besi, demikian pula dengan unsur-unsur lainnya. Jumlah material terlarut tergantung pada lamanya air kontak dengan batuan; semakin lama kontak, semakin tinggi kadar unsur-unsur terlarut di dalamnya (Sari, 2016).

Sebelum digunakan, air bersih harus memenuhi syarat-syarat kualitas secara fisika, kimia, dan biologi yang diatur dalam PERMENKES No. 2 Tahun 2023. Adapun parameter yang diatur di antaranya adalah zat besi (Fe) dan mangan (Mn). Kadar besi (Fe) dan mangan (Mn) yang terlalu tinggi dalam air bisa menghasilkan dampak negatif yang merugikan. Contohnya, mangan berlebih dapat mengganggu fungsi hati, sementara besi berlebih dapat meningkatkan risiko kanker hati, menyebabkan iritasi pada mata dan kulit, serta meninggalkan noda pada pakaian putih setelah dicuci (Palar, 2004).

Adanya kandungan Fe dan Mn dalam air tanah menyebabkan warna air tersebut berubah menjadi kuning-coklat setelah beberapa saat kontak dengan udara sehingga belum layak untuk dikonsumsi (Rahmawati & Sugito, 2015). Air tersebut ditandai dengan adanya flek-flek warna kuning kecoklatan yang terdapat pada bak air atau perabotan yang berhubungan dengan air. Berdasarkan hasil observasi, hal

tersebut juga terjadi pada lokasi penelitian sehingga dibutuhkan pengolahan yang tepat sebelum digunakan dalam kebutuhan sehari-hari.

Besi atau Ferrum (Fe) merupakan logam deret transisi pertama yang menjadikannya sebagai salah satu unsur paling umum di bumi. Kandungan besi (Fe) dalam air berasal dari mineral hasil pelapukan batuan asal yang ada di lingkungan perairan. Senyawa garam ferri dan ferro yang memiliki valensi dua adalah jenis senyawa besi yang sering ditemukan dalam air (Aini, 2022). Fe dengan kadar normal justru sangat diperlukan oleh makhluk hidup sebagai penyalur oksigen namun apabila berlebihan akan dapat menyebabkan kondisi hemokromatosis (Syarifuddin, 2022).

Mangan (Mn) termasuk golongan transisi yang merupakan logam berwarna putih abu-abu yang penampilannya serupa dengan besi tuang. Mangan adalah logam yang sering ditemukan di permukaan bumi dan sering hadir bersama besi. Menurut Febrina & Ayuna (2015), Mangan (Mn) memiliki warna merah keabu-abuan dan hadir di alam dalam berbagai senyawa dengan valensi yang berbeda. Kadar mangan (Mn) yang tinggi dalam air dapat menyebabkan perubahan rasa, warna menjadi coklat, ungu, atau hitam serta kekeruhan. Dalam jumlah kecil ($<0,5$ mg/l), mangan (Mn) dalam air tidak berdampak negatif pada kesehatan, bahkan memiliki manfaat untuk menjaga kesehatan otak dan tulang, berperan dalam pertumbuhan rambut dan kuku, serta membantu dalam produksi enzim untuk metabolisme tubuh. Namun, dalam jumlah yang besar ($>0,5$ mg/l), mangan (Mn) dalam air minum bisa menjadi neurotoksik. Gejalanya termasuk gangguan pada sistem saraf, kesulitan tidur, kelemahan otot kaki dan wajah yang mengakibatkan wajah terlihat kaku.

Air yang mengandung kadar logam seperti besi (Fe) dan mangan (Mn) dapat diolah menggunakan metode yang bervariasi seperti presipitasi, ekstraksi pelarut, pengapungan, ultra-filtrasi, elektrokoagulan, *reverse osmosis*, pertukaran ion, elektrodialisis, proses membran, penguapan, dan pengolahan secara biologis namun sebagian besar dari metode tersebut memiliki kelemahan seperti biaya yang tinggi, pembentukan limbah beracun, efisiensi yang rendah, serta kebutuhan akan energi dan ruang yang besar. Salah satu metode yang lebih mudah dan efektif adalah dengan metode kolom adsorpsi (Sunarto, 2022). Metode kolom adsorpsi dianggap lebih mudah dan lebih dapat diterapkan karena lebih mudah dari segi pencarian alat dan bahan, tidak memerlukan area yang besar, dan dalam operasinya tidak memerlukan keahlian khusus, dan telah banyak terbukti berhasil memisahkan logam (Batrisya & Sunanta, 2020).

Adsorpsi merupakan proses pada zat cair yang kemudian terikat pada zat penyerap yang dapat berupa padatan maupun cairan, yang biasanya disebut adsorben. Dalam metode kolom adsorpsi, adsorben yang umum digunakan di antaranya adalah zeolit dan karbon aktif. Menurut penelitian Sunarto (2022), metode kolom adsorpsi dengan media zeolit dan karbon aktif menghasilkan efisiensi penyisihan Fe dan Mn yang cukup tinggi dengan rata-rata 97,5% dan 98,33%.

Zeolit merupakan mineral hasil tambang yang bersifat lunak dan mudah kering. Zeolit memiliki area permukaan yang besar sehingga mendukung proses

penyerapan molekul. Untuk mengoptimalkan fungsi zeolit sebagai adsorben, diperlukan tindakan aktivasi pada zeolit sebelum digunakan. Zeolit sering dimanfaatkan dalam proses pengolahan berbagai jenis air, termasuk air limbah, air bersih, dan air minum. Penggunaan zeolit dapat membantu mengurangi kadar warna, NH_4^+ , serta ion-ion logam berat seperti Pb, Fe, Mn, Cr, dan Ni dalam air (Haryono, 2021).

Karbon aktif adalah arang yang sifat fisik dan kimianya telah diubah melalui perlakuan aktivasi dengan aktivator kimia atau dengan pemanasan pada suhu tinggi. Karbon aktif mempunyai bentuk amorf yang sebagian besar terdiri dari karbon bebas, mempunyai permukaan bagian dalam berongga, berwarna hitam, tidak berbau, dan tidak berasa, serta mempunyai daya serap yang jauh lebih besar dibandingkan karbon yang belum mengalami perlakuan aktivasi (Purwoto & Nugroho, 2013). Karbon aktif dinilai sangat efektif dalam menyerap logam berat karena luas permukaannya yang besar dan kemampuannya dalam menyerap berbagai jenis bahan kimia (Sufra, 2023).

Berdasarkan hal tersebut, diperlukan penelitian terkait metode kolom adsorpsi dengan penggunaan zeolit dan karbon aktif sebagai adsorben dalam menyisihkan kadar Fe dan Mn pada air tanah yang kemudian dikaji dalam penelitian dengan judul **“EFEKTIVITAS ZEOLIT DAN KARBON AKTIF DALAM PENURUNAN KADAR FE DAN MN AIR TANAH MENGGUNAKAN KOLOM ADSORPSI”**.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, adapun permasalahan yang akan dikaji dapat dirumuskan sebagai berikut.

1. Bagaimana karakteristik air tanah?
2. Bagaimana pengaruh jenis media zeolit dan karbon aktif serta kombinasi zeolit-karbon aktif sebagai adsorben dan waktu adsorpsi dalam penurunan Fe dan Mn pada air tanah?
3. Bagaimana efisiensi jenis media zeolit dan karbon aktif serta kombinasi zeolit-karbon aktif sebagai adsorben dan waktu adsorpsi dalam penurunan Fe dan Mn pada air tanah?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun penelitian ini dilakukan untuk mencapai tujuan sebagai berikut.

1. Mengetahui karakteristik air tanah.
2. Menganalisis pengaruh jenis media zeolit dan karbon aktif serta kombinasi zeolit-karbon aktif sebagai adsorben dan waktu adsorpsi dalam penurunan Fe dan Mn pada air tanah.
3. Menganalisis efisiensi jenis media zeolit dan karbon aktif serta kombinasi zeolit-karbon aktif sebagai adsorben dan waktu adsorpsi dalam penurunan Fe dan Mn pada air tanah.

1.4 Manfaat Penelitian

Penyusunan penelitian ini diharapkan agar mendapatkan manfaat sebagai berikut.

1. Bagi Penulis, sebagai bentukan konstribusi dalam menjalankan salah satu kewajiban Tri Dharma Perguruan Tinggi yaitu melakukan penelitian sebagai syarat untuk menyelesaikan studi sarjana di Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Bagi masyarakat, sebagai media yang memberi gambaran dan informasi mengenai metode kolom adsorpsi yang kiranya dapat diterapkan di kehidupan sehari-hari untuk menyisihkan kandungan logam pada air tanah.

1.5 Ruang Lingkup

Untuk mengarahkan penulis pada penelitian ini, maka diberikan batasan agar penulis dapat lebih fokus dan terarah pada suatu batasan tertentu. Adapun batasan masalah dalam studi ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian yang dilakukan berupa penelitian eksperimental terhadap air tanah dan dilaksanakan dalam skala laboratorium yang terletak di Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Prototype reaktor dibuat dengan skala kecil untuk pengolahan air tanah dengan metode kolom adsorpsi.
3. Sampel diambil langsung pada outlet distribusi air tanah.
4. Penelitian terhadap metode kolom adsorpsi pada penelitian ini dibatasi pada jenis media berupa zeolit, karbon aktif, dan kombinasi zeolit-karbon aktif, serta waktu adsorpsi selama 15, 30, dan 45 menit.
5. Pengujian kadar Fe dan Mn dilakukan sebelum dan sesudah pengolahan untuk mengetahui pengaruh dan efisiensi variabel dalam penelitian.

1.6 Teori

1.6.1 Air Tanah

Menurut Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air, air tanah adalah air yang terdapat dalam lapisan tanah atau batuan di bawah permukaan tanah. Air tanah merupakan air yang terletak di bawah permukaan tanah. Air ini ditemukan di akuifer dengan pergerakan yang sangat lambat, kecepatan alirannya berkisar antara 10^{-10} - 10^{-3} meter per detik. Pergerakan ini dipengaruhi oleh porositas, permeabilitas lapisan tanah, dan pengisian ulang air. Ciri utama yang membedakan air tanah dari air permukaan adalah pergerakannya yang sangat lambat dan waktu tinggalnya yang sangat lama, bisa mencapai puluhan bahkan ratusan tahun. Karena pergerakannya yang lambat dan waktu tinggal yang lama ini, air tanah akan sulit untuk pulih jika terjadi pencemaran (Effendi, 2003).

Pada siklus hidrologi, air meresap ke dalam tanah dan mengalir mengikuti gaya gravitasi bumi. Di zona tidak jenuh air, gaya adhesi antara butiran tanah menyebabkan pori-pori tanah terisi dengan campuran air dan udara dalam proporsi yang bervariasi. Setelah hujan, air bergerak ke bawah melalui zona tidak jenuh air (zona aerasi). Air beredar di dalam tanah dan tertahan oleh gaya kapiler di pori-pori kecil atau tarikan molekuler di sekitar partikel tanah. Ketika kapasitas retensi air tanah pada zona aerasi tercapai, air kemudian bergerak lebih dalam ke daerah di mana pori-pori tanah atau batuan sepenuhnya terisi air. Air di zona jenuh air ini disebut sebagai air tanah (Linsley, Kohler, & H., 1986).

Aliran air tanah merujuk pada bagian dari aliran sungai yang telah meresap (infiltrasi) ke dalam tanah (*ground*) dan mencapai zona jenuh air atau zona air tanah, kemudian mengalir kembali ke sungai melalui mata air (*springs*) atau rembesan air (*seepage water*) (Chorley, 1978).

Jenis air tanah. Adapun berdasarkan jenisnya, air tanah terbagi menjadi tiga golongan, yaitu air tanah dangkal, air tanah dalam, dan mata air (Sutrisno, 2002).

Air tanah dangkal. Air tanah dangkal terbentuk dari proses peresapan air dari permukaan tanah. Proses ini dimulai ketika air permukaan meresap ke dalam tanah melalui berbagai lapisan tanah. Selanjutnya, air tersebut akan terkumpul di suatu titik atau lapisan yang kedap air. Air tanah ini kemudian dapat digunakan sebagai sumber air minum atau air bersih melalui sumur dangkal. Biasanya, air tanah dangkal terkumpul pada kedalaman sekitar 15 meter. Kualitas air tanah dangkal cukup baik untuk sumber air minum, namun kuantitasnya kurang memadai karena bergantung pada musim. Air tanah dangkal terbentuk melalui proses peresapan air dari permukaan tanah. Lumpur dan sebagian bakteri akan tertahan, sehingga air tanah menjadi jernih, tetapi mengandung lebih banyak zat kimia (garam-garam, mineral, serta logam terlarut) karena melewati lapisan tanah dengan unsur kimia tertentu. Lapisan tanah ini berfungsi sebagai saringan. Selain penyaringan, kontaminasi juga terus berlangsung, terutama pada permukaan air yang dekat dengan permukaan tanah. Setelah mencapai lapisan kedap air, air yang terkumpul menjadi air tanah dangkal, yang digunakan sebagai sumber air minum melalui sumur-sumur dangkal (Parulian, 2009).

Air tanah dalam. Air tanah dalam, juga dikenal sebagai air artesis, terdapat di antara dua lapisan kedap air. Lapisan di antara dua lapisan kedap air tersebut disebut lapisan akuifer, yang mampu menampung banyak air. Jika lapisan kedap air tersebut retak, air akan secara alami keluar ke permukaan dan disebut mata air artesis. Pengambilan air tanah dalam lebih sulit dibandingkan dengan air tanah dangkal. Proses ini memerlukan pengeboran dan pemasangan pipa hingga mencapai kedalaman tertentu (biasanya antara 100-300 meter) untuk menemukan lapisan air. Jika tekanan air cukup besar, air akan menyembur keluar dan sumur ini disebut sumur air tanah artesis. Jika air tidak dapat keluar dengan sendirinya, pompa digunakan untuk membantu mengeluarkan air tanah dalam ini (Parulian, 2009).

Mata air. Mata air adalah tempat di mana air tanah merembes atau mengalir keluar ke permukaan tanah secara alami. Ini terjadi ketika air tanah dari lapisan akuifer muncul ke permukaan tanah. Air yang keluar dari mata air kemudian mengalir di atas tanah sebagai air permukaan melalui aliran sungai. Mata air sering dianggap sebagai sumber awal air bagi sungai-sungai (Hendrayana, *Dasar-Dasar Hidrogeologi*, 1994). Mata air yang dijumpai di pegunungan umumnya terdapat pada batuan vulkanik baik berupa endapan lahar, breksi dan lava, yang umumnya muncul karena adanya pemotongan topografi terhadap akuifernya. Mata air di pegunungan dianggap sebagai sumber air yang sempurna, baik kuantitas maupun kualitasnya. Debit mata air di pegunungan umumnya besar dan menerus, karena di daerah ini umumnya merupakan daerah basah dengan intensitas curah hujan tinggi dan masih mempunyai daerah tangkapan air yang relatif baik. Kualitas air yang didapatkan sangat baik, karena di daerah pegunungan dianggap sebagai awal pemunculan airtanah ke permukaan, dimana relatif belum banyak dipengaruhi oleh berbagai aktivitas manusia yang dapat menurunkan kualitas air tanah (Hendrayana, *Hidrogeologi Mata Air*, 2013).

1.6.2 Kualitas Air Tanah

Kualitas air tanah berkaitan dengan kondisi geologi di daerah sekitarnya seperti kandungan mineral yang ada pada tanah atau batuan, tingkat resistensi lapisan tanah atau batuan, dan lainnya (Cendikia & Mayasari, 2021). Kualitas air tanah di suatu daerah dapat dipengaruhi oleh limbah industri dan rumah tangga, yang biasanya berupa sampah dan dapat menyebabkan perubahan aroma dan warna air yang mengganggu masyarakat. Keberadaan limbah atau daerah pencemar di sekitar juga dapat memengaruhi kualitas air. Hubungan antara struktur kedalaman muka tanah dan dampak limbah sangat signifikan ketika proses infiltrasi tercampur oleh limbah. Jika struktur tanah kurang mampu menyaring air limbah tersebut, air yang terkandung dalam limbah dapat bercampur dengan air tanah (Pratiwi, Yushardi, Kurnianto, Astutik, & Apriyanto, 2022).

Kualitas air tanah sangat penting bagi kehidupan karena merupakan kebutuhan pokok bagi semua makhluk hidup dan digunakan setiap saat. Dalam penelitian air tanah, parameter kualitas air perlu diutamakan untuk mendapatkan hasil yang optimal, sesuai dengan parameter yang diatur dalam PERMENKES RI Nomor 2 Tahun 2023 Tentang Pelaksanaan PP 66/2014 Tentang Penyehatan Lingkungan (Genakalong, Jusfarida, & Bahar, 2021).

PERMENKES RI Nomor 2 Tahun 2023 menyatakan bahwa Air untuk Keperluan Higiene dan Sanitasi adalah air yang digunakan untuk keperluan higiene perorangan dan/ atau rumah tangga. Kualitas dari air tersebut harus memenuhi Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan dengan parameter fisik, biologi dan kimia serta Persyaratan Kesehatan yang diatur.

Standar baku mutu kesehatan lingkungan. Penerapan SBMKL media Air untuk Keperluan Higiene dan Sanitasi diperuntukkan bagi rumah tangga yang mengakses secara mandiri atau yang memiliki sumber air sendiri untuk keperluan sehari-hari. Berdasarkan PERMENKES RI Nomor 2 Tahun 2023, parameter di baku mutu Air untuk Keperluan Higiene dan Sanitasi dikategorikan menjadi tiga, yaitu mikrobiologi, fisik, dan kimia di mana parameter besi dan mangan masuk dalam kategori kimia.

Tabel 1. Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan Air untuk Keperluan Higiene dan Sanitasi

Jenis Parameter	Kadar maksimum yang diperbolehkan	Satuan	Metode Pengujian
Besi (Fe) (terlarut)	0,2	mg/L	SNI/APHA
Mangan (Mn) (terlarut)	0,1	mg/L	SNI/APHA

Sumber: PERMENKES No. 2 Tahun 2023

1.6.3 Besi (Fe)

Besi adalah salah satu unsur kimia yang dapat ditemukan hampir di mana-mana di bumi, termasuk semua lapisan geologis dan badan air. Biasanya, besi dalam air dapat berada dalam bentuk terlarut sebagai Fe^{2+} (fero) atau Fe^{3+} (feri); tersuspensi sebagai butiran koloid (diameter $<1 \mu\text{m}$) atau lebih besar, seperti Fe_2O_3 , FeO , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, dan sebagainya; atau berikatan dengan zat organik atau zat padat anorganik (seperti tanah liat). Pada air permukaan, kadar Fe jarang melebihi 1 mg/l, tetapi dalam air tanah, kadar Fe bisa jauh lebih tinggi. Konsentrasi Fe yang tinggi ini dapat terasa dan dapat menodai kain serta peralatan dapur (Febrina & Ayuna, 2015).

Air tanah, terutama di sumur, sering kali memiliki kandungan besi yang tinggi. Air tanah dengan konsentrasi karbondioksida yang tinggi dapat menciptakan kondisi anaerobik, yang mengubah besi tidak larut (Fe^{3+}) menjadi besi larut (Fe^{2+}). Konsentrasi besi dalam air tanah bervariasi antara 0,01 mg/l hingga 25 mg/l. Ion besi (Fe^{2+}) mudah larut dalam air, namun akan teroksidasi oleh oksigen terlarut menjadi $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang mengendap. Fe^{2+} dalam air sering berasal dari pelepasan ion dari bahan organik (Sari, 2016).

Menurut Y.P Tirta Dharma (2002), kehadiran ion Fe^{2+} yang terlarut dalam air dapat menimbulkan gangguan-gangguan seperti :

1. Rasa dan bau logam yang amis pada air, disebabkan karena bakteri mengalami degradasi.
2. Menimbulkan warna kecoklat-coklatan pada pakaian putih.
3. Meninggalkan noda pada bak-bak kamar mandi dan peralatan lainnya (noda kecoklatan disebabkan oleh besi).
4. Dapat mengakibatkan penyempitan atau penyumbatan pada pipa

1.6.4 Mangan (Mn)

Mangan adalah salah satu logam yang umumnya ditemukan dalam jumlah besar di kerak bumi sering kali hadir bersama besi dan digunakan terutama dalam pembuatan besi dan baja, serta sebagai oksidan dalam proses pembersihan, pemutihan, dan desinfeksi, misalnya sebagai kalium permanganat. Mangan ada dalam berbagai produk dan memiliki bentuk oksidasi penting seperti Mn^{2+} , Mn^{4+} , dan Mn^{7+} yang berperan dalam lingkungan dan biologi. Mangan terjadi secara alami dalam sumber air permukaan dan air tanah, terutama dalam kondisi oksidasi yang rendah (Haryono, 2021).

Ada dua bentuk mangan yang umum, yaitu manganous (Mn^{2+}) dan manganic (Mn^{4+}). Mangan dalam bentuk Mn^{4+} di dalam tanah cenderung berubah menjadi senyawa oksida mangan dalam kondisi anaerobik, di mana dekomposisi bahan organik dalam air yang kaya akan menyebabkan Mn^{4+} larut karena mengalami reduksi menjadi Mn^{2+} . Di lingkungan air dengan cukup oksigen, Mn^{2+} akan mengalami reoksidasi menjadi Mn^{4+} dan kemudian mengalami presipitasi serta mengendap di dasar perairan (Effendi, 2003).

Mangan (Mn) memiliki sifat-sifat yang mirip dengan besi (Fe), sehingga pengaruhnya juga hampir serupa. Seperti besi (Fe), mangan (Mn) adalah logam esensial yang dibutuhkan oleh tubuh. Kehadiran mangan (Mn) dalam jumlah berlebihan dalam air dapat menyebabkan perubahan rasa, warna, dan kekeruhan yang serupa dengan keberadaan besi (Febrina & Ayuna, 2015).

1.6.5 Zeolit

Nama zeolit berasal dari kata "*zein*" yang berarti mendidih, dan "*lithos*" yang berarti batuan, disebut demikian karena mineral ini memiliki sifat mendidih dan mengembang jika dipanaskan. Zeolit merupakan batuan atau mineral alami secara kimia yang termasuk dalam kelompok mineral silikon dioksida. Mineral ini dinyatakan sebagai aluminasilicate tetrahidrat, yang memiliki bentuk terbagi halus dan merupakan produk sekunder yang stabil di bawah kondisi permukaan karena proses sedimentasi, pelapukan, dan aktivitas hidrotermal. Zeolit adalah mineral lunak yang mudah kering. Zeolit berwarna putih keabu-abuan, putih kehijauan, dan putih kekuningan. Kebanyakan kristal zeolit berukuran kurang dari 10-15 mikrometer (Sutarti, 1994).

Zeolit merupakan kristal berongga yang terbentuk oleh jaringan silika laumina tetrahedral tiga dimensi dan mempunyai struktur yang relatif teratur dengan rongga yang didalamnya terisi logam alkali atau alkali tanah sebagai penyeimbang muatannya. Rongga-rongga tersebut merupakan suatu sistem saluran yang didalamnya terisi oleh molekul air (Ismaryata, 1999).

Berdasarkan (Permana, 2013), terdapat 46 mineral zeolit alami dan lebih dari 150 zeolit sintetis yang dikenal dalam literatur, masing-masing dengan karakteristik unik. Secara umum, struktur zeolit memiliki beberapa karakteristik utama :

1. Zeolit sangat berpori, karena kristalnya terbentuk dari kerangka jaring tetrahedral SiO_4 dan AlO_4 .
2. Pori-porinya berukuran molekul, terbentuk dari tumpukan cincin n-ring yang beranggotakan 6, 8, 10, atau 12 tetrahedral.
3. Zeolit memiliki kemampuan pertukaran kation, karena perbedaan muatan Al^{3+} dan Si^{4+} menjadikan atom Al dalam kerangka kristal bermuatan negatif dan membutuhkan kation penetral, yang mudah digantikan dengan kation lainnya.
4. Zeolit dapat dijadikan padatan yang bersifat asam, karena penggantian kation penetral dengan proton-proton menjadikannya padatan asam Bronsted.
5. Zeolit mudah dimodifikasi, karena setiap tetrahedral dapat dihubungkan dengan bahan-bahan pemodifikasi.

Zeolit dengan struktur kerangka tiga dimensi memiliki luas permukaan yang besar, memungkinkan zeolit untuk menyerap molekul gas pada posisi molekul air dalam kristalnya. Kemampuan penyerapan ini tidak hanya dipengaruhi oleh ukuran partikel, tetapi juga oleh muatan dan lokasi kation yang berada di dalam rongga zeolit. Agar efektif sebagai sorben, zeolit harus diaktivasi terlebih dahulu untuk menghilangkan molekul air (Las & Zamroni, 2002).

Polaritas muatan zeolit membuat kristal zeolit memiliki afinitas terhadap molekul-molekul polar, seperti air. Semua zeolit alami mengandung air karena air, sebagai molekul polar, mudah teradsorpsi di permukaan zeolit. Air mengisi seluruh saluran dan rongga dalam kristal zeolit karena ukurannya yang kecil. Air teradsorpsi ini dapat didesorpsi dengan pemanasan atau pemvakuman, dan akan teradsorpsi kembali ketika zeolit bersentuhan dengan air atau uap air. Jenis dan konsentrasi kation dalam kristal zeolit sangat mempengaruhi ukuran saluran bebas; semakin besar kation, semakin kecil ukuran saluran. Pengaruh ukuran kation ini dapat dimanfaatkan untuk mengendalikan sifat ayakan molekul. Konsentrasi kation yang setara dengan konsentrasi Al menciptakan medan listrik elektrostatik, yang kekuatannya dipengaruhi oleh jenis dan distribusinya. Sifat ini mempengaruhi selektivitas adsorpsi permukaan zeolit (Permana, 2013).

Zeolit sering digunakan dalam pengolahan air, termasuk air limbah, air bersih, dan air minum. Zeolit efektif dalam menurunkan kandungan warna, NH_4^+ , dan ion-ion logam berat seperti Pb, Fe, Mn, Cr, dan Ni (Widianti, 2006). Zeolit dapat digunakan sebagai adsorben karena memiliki struktur kristal yang berpori dan luas permukaan yang besar. Zeolit tersusun dari kerangka silika-alumina, memiliki stabilitas termal yang tinggi, harganya terjangkau, dan ketersediaannya cukup melimpah (Handoko, 2002).

Muatan negatif yang dimiliki oleh zeolit memungkinkannya untuk mengikat kation dalam air. Zeolit memiliki sifat unik yang menjadikannya berguna dalam berbagai aplikasi, seperti kemampuan untuk melakukan pertukaran ion dan selektivitas penyerapan yang tinggi. Ketika air baku dialirkan melalui filter zeolit, kation akan diikat oleh muatan negatif pada zeolit. Zeolit juga mudah melepaskan

kation dan menggantinya dengan kation lain. Contoh penggunaan zeolit termasuk sebagai adsorben, katalis, penukar ion, dan membran. Sebagai adsorben, zeolit mengikat senyawa dan molekul tertentu di permukaannya melalui interaksi fisik seperti gaya van der Waals dan interaksi kimia dengan sifat elektrostatik (Ronaldo, 2008).

Untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi, zeolit dapat diaktivasi secara fisik atau kimia. Aktivasi fisik dapat dilakukan dengan pemanasan ($300-4.000^{\circ}\text{C}$) untuk mengdehidrasi zeolit, membuka pori-pori atau rongga utama, dan memperluas medan listrik rongga, sehingga menjadi lebih efektif untuk bereaksi. Aktivasi kimia dapat dilakukan dengan larutan asam (H_2SO_4), basa (NaOH), atau garam (NaCl) untuk membersihkan pori-pori, menghilangkan senyawa pengotor, dan mengatur kembali letak atom yang dapat dipertukarkan, sehingga diharapkan dapat meningkatkan daya tukar kationnya (Widianti, 2006).

1.6.6 Karbon Aktif

Karbon atau arang adalah suatu bahan padat berpori yang dihasilkan melalui proses pirolisis dari bahan-bahan yang mengandung karbon. Arang aktif atau karbon aktif adalah arang yang konfigurasi atom karbonnya dibebaskan dari ikatan dengan unsur lain serta rongga atau porinya dibersihkan dari senyawa lain atau kotoran, sehingga permukaan dan pusat aktifnya menjadi luas atau meningkatkan daya adsorpsi terhadap cairan dan gas (Sudrajat dan Soleh, 1994). Arang aktif mempunyai sifat sebagai adsorben yang dapat mengadsorpsi gas dan senyawa-senyawa kimia tertentu atau sifat adsorpsinya selektif, tergantung pada besar atau volume pori-pori dan luas permukaan (Nugroho, 2013).

Arang aktif atau karbon aktif, adalah karbon yang telah diproses sedemikian rupa sehingga pori-porinya terbuka, sehingga memiliki daya serap yang tinggi. Keaktifan daya serap karbon aktif bergantung pada kadar senyawa karbonnya, yang berkisar antara 85% hingga 95% karbon bebas. Arang aktif mampu mengadsorpsi gas dan senyawa kimia tertentu, dengan sifat adsorpsi yang selektif berdasarkan ukuran atau volume pori-pori dan luas permukaan. Daya serap arang aktif sangat besar, yaitu mencapai 25-100% dari berat arang aktif itu sendiri (Rahmadhani, 2014).

Arang aktif mempunyai beberapa karakteristik, antara lain berupa padatan yang berwarna hitam, tidak berasa, tidak berbau, bersifat higroskopis, tidak larut dalam air, asam, basa ataupun pelarut-pelarut organik. Di samping itu, arang aktif juga tidak rusak akibat pengaruh suhu maupun penambahan pH selama proses aktivasi. Arang aktif tidak hanya mengandung atom karbon saja, tetapi juga mengandung sejumlah kecil oksigen dan hidrogen yang terikat secara kimia dalam bentuk gugus-gugus fungsi yang bervariasi, misalnya gugus karbonil (CO), karboksil (COO), fenol, lakton, dan beberapa gugus eter. Oksigen pada permukaan arang aktif, kadang-kadang berasal dari bahan baku atau dapat juga terjadi pada proses aktivasi dengan uap (H_2O) atau udara. Keadaan ini biasanya dapat menyebabkan arang bersifat asam atau basa. Pada umumnya bahan baku arang aktif mengandung komponen mineral. Komponen ini menjadi lebih pekat selama proses aktivasi arang. Di samping itu,

bahan-bahan kimia yang digunakan pada proses aktivasi sering kali menyebabkan perubahan sifat kimia arang yang dihasilkan (Lempang, 2014).

Dalam pengolahan air, karbon aktif digunakan sebagai adsorben untuk menghilangkan rasa, bau, atau warna yang tidak diinginkan. Proses adsorpsi dengan karbon aktif berbeda tergantung pada bentuknya, apakah bubuk atau butiran. Karbon aktif bubuk biasanya ditambahkan langsung ke dalam air yang diolah dan dicampur secara merata untuk memastikan kontak yang baik, kemudian diendapkan. Sementara itu, karbon aktif berbentuk butiran digunakan sebagai media filter dalam kolom adsorpsi (Masduqi & Assomadi, 2012).

1.6.7 Adsorpsi

Adsorpsi adalah proses di mana fluida (baik cairan maupun gas) terikat pada permukaan suatu padatan dan membentuk lapisan tipis di permukaan tersebut. Ini berbeda dengan absorpsi, di mana fluida diserap oleh fluida lain dan membentuk larutan (Nansa, 2014).

Adsorpsi adalah proses dimana substansi terlarut dalam larutan menggumpal di permukaan zat penyerap, yang menyebabkan bahan tersebut masuk dan terkumpul dalam zat penyerap. Proses ini sering terjadi bersamaan dengan proses lain, sehingga kadang disebut sebagai sorpsi. Dalam adsorpsi, terdapat adsorben, yaitu zat penyerap, dan adsorbat, yaitu zat yang diserap (Giyatmi, 2008).

Mekanisme Adsorpsi. Adsorpsi adalah proses dimana suatu zat (molekul atau ion) terserap pada permukaan adsorben. Mekanisme adsorpsi digambarkan sebagai proses fisika dimana molekul yang awalnya ada dalam larutan menempel pada permukaan zat adsorben. Molekul dapat teradsorpsi jika gaya adhesi antara molekul adsorbat dan adsorben lebih besar daripada gaya kohesi antar molekul itu sendiri. Proses penghilangan oleh adsorpsi dapat terjadi karena adanya luas permukaan; semakin luas permukaan adsorben yang tersedia, semakin banyak molekul yang dapat diserap (Basset, 1994). Proses adsorpsi oleh suatu adsorben dipengaruhi oleh berbagai faktor dan memiliki pola isoterm adsorpsi yang khas. Faktor-faktor yang mempengaruhi proses adsorpsi antara lain jenis adsorben, jenis zat yang diserap, luas permukaan adsorben, konsentrasi zat yang diadsorpsi, dan suhu. Karena adanya faktor-faktor ini, setiap adsorben akan memiliki pola adsorpsi yang berbeda saat menyerap berbagai zat (Wijayanti & Kurniawati, 2019).

Jenis Adsorpsi. Terdapat dua jenis adsorpsi, yaitu adsorpsi fisika dan kimia. Adsorpsi kimia terjadi akibat interaksi kimia antara permukaan adsorben dan adsorbat. Sebaliknya, adsorpsi fisika terjadi karena adanya gaya Van der Waals dan gaya elektrostatis antara molekul adsorbat dan atom-atom pada adsorben (Treybal, 1980).

Adsorpsi kimia. Adsorpsi kimia terjadi karena adanya gaya-gaya kimia yang diikuti oleh reaksi kimia. Pada adsorpsi kimia, hanya satu lapisan gaya yang terbentuk, dengan energi adsorpsi sekitar ± 100 kJ/mol. Jenis adsorpsi ini membentuk ikatan kimia yang kuat, sehingga menghasilkan senyawa baru melalui reaksi kimia. Ikatan kimia yang terbentuk dalam kemisorpsi sangat kuat dalam mengikat molekul

gas atau cairan dengan permukaan padatan, membuatnya sulit untuk dilepaskan kembali (irreversibel). Oleh karena itu, kemungkinan pelepasan kembali molekul yang terikat pada adsorben dalam kemisorpsi sangat kecil (Alberty, 1997).

Adsorpsi fisika. Adsorpsi fisika terjadi ketika gaya intermolekular lebih besar daripada gaya tarik antar molekul atau gaya tarik yang relatif lemah antara adsorbat dan permukaan adsorben. Gaya ini disebut gaya Van der Waals, yang memungkinkan adsorbat bergerak dari satu bagian permukaan ke bagian permukaan lain dari adsorben. Gaya antar molekul adalah gaya tarik antara molekul-molekul fluida dengan permukaan padat, sedangkan gaya intermolekular adalah gaya tarik antar molekul-molekul fluida itu sendiri (Sudirjo, 2005).

Adsorpsi juga dapat terjadi melalui mekanisme pertukaran ion. Permukaan padatan dapat mengadsorpsi ion-ion dari larutan dengan cara ini, dimana ion pada gugus senyawa permukaan padatan adsorben bertukar tempat dengan ion-ion adsorbat. Mekanisme ini menggabungkan kemisorpsi dan fisorpsi, karena adsorpsi jenis ini mengikat ion-ion yang diadsorpsi dengan ikatan kimia yang dapat dilepaskan kembali untuk memungkinkan pertukaran ion terjadi (Atkins, 1990).

Umumnya adsorpsi ion logam dari larutan ke permukaan adsorben merupakan adsorpsi fisika, yang dimana tidak terjadi reaksi kimia atau pengikatan secara ionik logam dengan adsorben (Islam, 2018).

1.6.8 Model Thomas

Model Thomas merupakan salah satu persamaan yang dapat digunakan dalam metode kolom. Laju adsorpsi pada model Thomas dikendalikan oleh reaksi antara adsorbat dengan adsorben sehingga adsorbatnya teradsorpsi ke permukaan adsorben secara langsung. Model Thomas diterapkan untuk mengestimasi kapasitas adsorpsi adsorben dan menggambarkan proses adsorpsi dalam Kurva *Breakthrough*. Kesesuaian data dengan model Thomas ditunjukkan dari nilai R^2 yang dihasilkan dari plot model. Nilai R^2 yang tinggi menandakan model Thomas sesuai dengan data-data hasil eksperimen, sehingga dapat digunakan sebagai parameter acuan desain. Berikut adalah rumus persamaan model Thomas.

$$\frac{C_e}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{K_{Th} \cdot q_0 \cdot X}{Q} - \frac{C_0 \cdot t}{1000}\right)}$$

Keterangan :

K_{Th} = laju adsorpsi (ml/mg.menit⁻¹)

q_0 = kapasitas maksimum adsorpsi (mg/g)

t = waktu adsorpsi (menit)

x = massa adsorben (gram)

Q = debit (ml/menit)

1.6.9 Penelitian Terdahulu

No.	Judul	Hasil	Sumber
1.	Adsorbsi Logam Berat Besi dan Timbal Menggunakan Zeolit Alam Bayah Teraktivasi	Hasil penelitian menunjukkan bahwa zeolit alam Bayah yang telah diaktivasi cukup efektif digunakan sebagai adsorben untuk mengadsorpsi logam berat seperti Fe. Waktu optimum proses adsorpsi Fe adalah 90 menit dengan penurunan kandungan Fe sebesar 92,82%. Dalam penelitian ini kandungan Pb yang terdeteksi dalam air limbah TPA Cilowong kurang dari 10 mg/L sehingga tidak dapat dianalisa kadar penurunannya setelah proses adsorbsi.	Elysabeth, 2015
2.	Aktivasi Zeolit dan Karbon Aktif Dalam Menurunkan Kesadahan Air Di Kampung Sapiria Kota Makassar	Hasil penelitian menunjukkan bahwa media zeolit efektif dalam menurunkan kesadahan dengan rata-rata efisiensi yaitu 52,05% dengan hasil rata-rata penurunan dari 76,82 mg/l. Media karbon aktif tidak efektif dalam menurunkan kesadahan karena mendapatkan hasil minus yaitu 53,27% dengan hasil rata-rata peningkatan 74,86 mg/l. Media kombinasi zeolit-karbon aktif efektif dalam menurunkan kesadahan dengan rata-rata efisiensi yaitu 31,5% dengan hasil rata-rata penurunan dari 109,75 mg/l.	Sudarni & Haderiah, 2020
3.	Pemisahan Ion Logam Besi dan Mangan Pada Air Sumur (Dalam) Wonobojo Menggunakan Metode Kolom Adsorpsi	Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin lama metode adsorpsi kolom dengan adsorben zeolit dan arang aktif digunakan maka efisiensinya dalam menurunkan kadar Fe dan Mn semakin meningkat. Efisiensi penjerapan cukup tinggi dengan rata-rata 97,50% untuk Fe dan 98,33% untuk Mn.	Sunarto, 2022
4.	Pemisahan Ion Logam Ca Dan Fe Dalam Air Sumur Secara Kolom Adsorpsi Dengan Zeolit Alam dan Karbon Aktif	Hasil penelitian memperlihatkan bahwa kemampuan adsorpsi zeolit terhadap ion logam Ca dan Fe cukup efektif. Zeolit 1 (10 mesh) mampu menurunkan besi hingga 93,98% sedangkan zeolit 2 (5 mesh) hingga 98,88% dalam kurun waktu 1-4 minggu. Sedangkan penurunan kadar kalsium kurang efektif, di mana penurunan kadar yang signifikan baru terlihat pada kurun waktu 2 minggu penyerapan kalsium yang hasilnya mendekati 50 %.	Suyanta, 2015

No.	Judul	Hasil	Sumber
5.	Pengaruh Waktu, dan Dosis Adsorben Terhadap Penghilangan Ion Fe dalam Air Sumur Menggunakan Zeolit Alam Teraktivasi secara Kolom Adsorpsi	Waktu adsorpsi dilakukan dengan variasi 15 menit; 30 menit; 45 menit dan 60 menit, sedangkan variasi adsorben yang digunakan yaitu 0,5 g ; 1,0 g; 1,5 g; 2,0 g. Dari hasil penelitian diperoleh semakin lama waktu dan bobot adsorben maka semakin meningkat pula kapasitas adsorpsi. Efisiensi penyerapan tertinggi berdasarkan waktu kontak adsorben yaitu pada menit 60 menit sebesar 99,04%, sedangkan efisiensi adsorpsi optimum berdasarkan bobot adsorben yaitu 2,0 gram dengan nilai efisiensi adsorpsi sebesar 98,01%.	Adam, 2018
6.	Penggunaan Zeolit Alam Teraktivasi dan Karbon Aktif dalam Menurunkan Kesadahan Air Di Kalurahan Girisuko, Kapanewon Panggang, Kabupaten Gunungkidul, DIY	Penggunaan zeolit alam teraktivasi memiliki efisiensi tertinggi dalam menurunkan TDS 47,92%, DHL 49,22%, kesadahan 50,81%, Mg 89,12% , dan Ca 44,87%. Penggunaan karbon aktif memiliki efisiensi tertinggi dalam menurunkan TDS 8,33%, DHL 10,71%, kesadahan 45,16% , Mg 93,48% , dan Ca 55,13%. Hasil percobaan menunjukkan bahwa adsorben zeolit alam teraktivasi mampu menyerap ion-ion penyebab kesadahan yang terlarut dalam air lebih baik dibandingkan dengan adsorben karbon aktif.	Azizah, 2024
7.	Penurunan Kadar Logam Fe & Zn Pada Air Lindi Menggunakan Media Karbon Aktif dan Zeolit Sebagai Adsorben	Hasil penelitian menunjukkan bahwa besarnya penurunan nilai kandungan logam berat Fe yang diadsorpsi oleh media adsorben zeolit mengalami penurunan sebesar 88,48% dengan waktu tinggal paling efektif 360 menit. Sedangkan oleh media adsorben arang aktif yaitu sebesar 80,73% dengan waktu tinggal paling efektif 360 menit. Pada logam berat Zn yang diadsorpsi oleh media adsorben zeolit mengalami penurunan sebesar 6,45% dengan waktu tinggal paling efektif 120 menit. Sedangkan oleh media adsorben arang aktif mengalami penurunan sebesar 60,06% dengan waktu tinggal paling efektif 300 menit.	Kadri, 2016
8.	<i>Separation of Manganese Metal Ions with Natural Zeolite</i>	Hasil penelitian menunjukkan bahwa zeolit dan karbon aktif dapat menurunkan 90,404% kadar mangan pada air tanah dangkal. Semakin lama	Batrisya & Sunanta, 2020

No.	Judul	Hasil	Sumber
	<i>Adsorbents and Activated Charcoal of Shall Water use Column Adsorption Method</i>	waktu penggunaan adsorben maka semakin rendah pula efisiensinya dalam menurunkan kadar mangan yang ditunjukkan oleh data efisiensi pada hari 1 adalah 95,960%; hari 7 93,266%; hari 14 90,572%; hari 21 89,899%; hari 28 88,889%; dan hari 35 83,838%.	

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama dua bulan, terhitung sejak bulan agustus hingga september 2024 yang dimulai dari pembuatan reaktor, pengambilan sampel, pengambilan data hingga pengolahan data. Pembuatan reaktor dilakukan di Laboratorium Kualitas Air Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Hal ini dikarenakan perlunya pemantauan langsung reaktor. Pengambilan sampel dilakukan di Kampus Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Gowa. Adapun tahapan pengujian sampel dilakukan di Laboratorium Kualitas Air Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik. Lokasi Penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi penelitian

2.2 Variabel Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan adalah penelitian dengan jenis eksperimental yang kemudian dilanjutkan dengan studi kuantitatif untuk mengetahui efektivitas kolom adsorpsi dalam penyisihan kadar Fe dan Mn air tanah. Adapun variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

2.2.1 Variabel Bebas

Variabel bebas atau *independent variable* merupakan variabel yang bisa berdiri sendiri tanpa dipengaruhi oleh variabel lain. Variabel bebas juga merupakan variabel yang menjadi sebab dari pengaruh yang timbul pada variabel terikat. Variabel bebas pada penelitian ini adalah jenis media yang digunakan dan waktu adsorpsi pada media yang kemudian akan dijelaskan sebagai berikut.

Jenis Media. Berdasarkan penelitian Sunarto (2022), jenis media yang digunakan sebagai adsorben pada kolom adsorpsi akan menghasilkan efektivitas penyisihan kontaminan yang berbeda. Adapun variasi jenis media sebagai adsorben pada reaktor adalah zeolit, karbon aktif, dan kombinasi zeolit-karbon aktif.

Waktu Adsorpsi. Berdasarkan penelitian terdahulu oleh Kadri (2016) variasi waktu adsorpsi akan menghasilkan efektivitas penyisihan kontaminan yang berbeda. Adapun variasi waktu tinggal yang dipilih pada reaktor adalah 15, 30, dan 45 menit. Variasi ini dipilih berdasarkan penelitian terdahulu oleh Kadri (2016) yang menggunakan variasi tersebut dengan hasil efektivitas meningkat seiring bertambahnya waktu adsorpsi.

2.2.2 Variabel Terikat

Variabel terikat atau *dependent variable* adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas dan merupakan faktor yang akan diamati dan diteliti pada penelitian. Variabel terikat pada penelitian ini adalah kadar penurunan Besi (Fe) dan Mangan (Mn) pada air tanah.

Dari penjabaran variabel di atas maka diperoleh matriks penelitian sebagai berikut.

Tabel 2. Matriks penelitian

Waktu Adsorpsi	Jenis Media		
	M1	M2	M3
T1	M1T1	M2T1	M3T1
T2	M1T2	M2T2	M3T2
T3	M1T3	M2T3	M3T3

Keterangan :

- M1 : Zeolit
- M2 : Karbon aktif
- M3 : Kombinasi zeolit dan karbon aktif
- T1 : Waktu adsorpsi 15 menit
- T2 : Waktu adsorpsi 30 menit
- T3 : Waktu adsorpsi 45 menit

2.3 Populasi dan Sampel

Populasi penelitian adalah keseluruhan dari objek penelitian yang akan diteliti. Sampel adalah bagian dari jumlah dan karakteristik yang dimiliki oleh populasi tersebut. Populasi pada penelitian ini adalah air tanah, sedangkan sampel yang digunakan adalah air tanah yang akan diambil pada outlet distribusi air tanah di lokasi penelitian.

2.4 Alat dan Bahan Uji

Pada penelitian ini, dibutuhkan alat dan bahan dalam tahap-tahapnya yang meliputi perakitan reaktor hingga pengujian sampel. Berikut adalah alat dan bahan yang diperlukan.

2.4.1 Alat Uji

Berikut adalah alat yang dibutuhkan dalam pelaksanaan penelitian ini mulai dari tahap perakitan reaktor hingga pengujian sampel.

1. Reaktor kolom adsorpsi, digunakan untuk mengolah air tanah dengan metode adsorpsi.
2. Zeolit, digunakan sebagai media dalam proses adsorpsi.
3. Karbon aktif, digunakan sebagai media dalam proses adsorpsi.
4. Spektrofotometri UV-VIS, digunakan untuk mengukur kadar besi (Fe) dan mangan (Mn).
5. Kuvet, digunakan sebagai wadah dalam mengukur kadar logam besi (Fe) dan mangan (Mn) di Spektrofotometri UV-VIS.
6. Gelas Piala, digunakan untuk mewadahi larutan.
7. Pipet volumetrik, digunakan untuk mengukur volume tertentu larutan sebelum ditambahkan.
8. Labu ukur, digunakan untuk membuat larutan kerja dengan kadar tertentu.
9. Neraca digital, digunakan untuk mengukur berat bahan yang berbentuk padatan (serbuk)
10. Kaca arloji, digunakan sebagai wadah untuk mengukur berat bahan yang berbentuk padatan (serbuk) dengan neraca digital.
11. Kompor, digunakan untuk memanaskan larutan sebagai proses destruksi.
12. Labu semprot, digunakan untuk mewadahi aquades.

2.4.2 Bahan Uji

Berikut adalah bahan yang dibutuhkan dalam pelaksanaan penelitian ini mulai dari tahap perakitan reaktor hingga pengujian sampel.

1. Air tanah, sebagai sampel penelitian yang akan diolah.
2. Aquades, sebagai pengencer pada pembuatan larutan kerja.

3. Reagen pengujian besi (Fe) dan mangan (Mn), sebagai bahan kimia yang digunakan dalam pengujian.

2.5 Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini dilakukan berdasarkan studi kuantitatif dengan pengumpulan data dilakukan secara eksperimental di laboratorium. Data yang dikelola pada penelitian ini adalah data primer yang didapatkan dari hasil eksperimen di laboratorium. Data yang didapatkan berupa data konsentrasi awal dan akhir parameter Fe dan Mn tiap sampel yang telah melewati kolom adsorpsi. Teknik pengumpulan data dilakukan dengan tahapan sebagai berikut.

2.5.1 Perencanaan desain reaktor

Tahapan perencanaan desain reaktor dilakukan dengan mengacu pada penelitian terdahulu tentang kolom adsorpsi yang dimodifikasi untuk menyesuaikan skala penelitian. Reaktor kolom dibuat dari pipa PVC 4" (10 cm) dengan volume 5 L atau 5000 cm³. Dimensi reaktor terhitung sebagai berikut.

Dimensi Reaktor :

$$\begin{aligned}
 V &= \pi \cdot r^2 \cdot h \\
 5000 \text{ cm}^3 &= 3,14 \times 5^2 \times h \\
 h &= \frac{5000 \text{ cm}^3}{78,5 \text{ cm}^2} \\
 &= 63,69 \text{ cm} \sim 64 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Tinggi Media :

$$\begin{aligned}
 h_{media} &= 60\% \times h \\
 &= 60\% \times 64 \text{ cm} \\
 &= 38,4 \text{ cm} \sim 39 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Dimensi Total Reaktor :

$$\begin{aligned}
 h_{freeboard} &= 10\% \times h \\
 &= 10\% \times 64 \text{ cm} \\
 &= 6,4 \text{ cm} \sim 6 \text{ cm} \\
 h_{total} &= h + freeboard \\
 &= 64 \text{ cm} + 6 \text{ cm} \\
 &= 70 \text{ cm} \\
 V_{eff} &= \pi \cdot r^2 \cdot h_{total} \\
 &= 3,14 \times 5^2 \times h_{total} \\
 &= 3,14 \times 5^2 \times 70 \\
 &= 5405 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

Reaktor kolom diisi dengan media zeolit, karbon aktif, dan kombinasi zeolit-karbon aktif secara terpisah. Media zeolit dan karbon aktif masing-masing akan diisi dengan ketinggian 39 cm, dan untuk media kombinasi zeolit-karbon aktif akan diisi

masing-masing 19,5 cm. Ketinggian freeboard akan diisi dengan *gravel* di bawah media untuk mencegah media ikut terseret keluar melalui keran effluent.

2.5.2 Persiapan eksperimen

Persiapan alat dan bahan. Persiapan eksperimen dilakukan dengan menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan dalam eksperimen. Alat atau instrumen utama adalah spektrofotometri, yang dalam penelitian ini adalah Spektrofotometri SP 2000 UV yang dilengkapi dengan lampu halogen deuterium dan tungsten untuk memasok cahaya, yang memancarkan cahaya dalam rentang panjang gelombang 200-1000nm. Adapun rentang absorpsi dari Spektrofotometri SP 2000 UV adalah 0,097A - 2,5A. Media yang digunakan adalah zeolit dan karbon aktif granular komersial yang telah diaktivasi sehingga tidak perlu diaktivasi kembali (Tuas, 2018). Selanjutnya media akan dibersihkan dengan pencucian untuk menghilangkan partikel-partikel halus yang menempel sehingga tidak mengotori sampel. Media kemudian dikeringkan secara manual dengan udara terbuka sesuai dengan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Atmono (2017).

Perakitan reaktor kolom adsorpsi. Setelah dilakukannya persiapan alat dan bahan maka hal yang dilakukan yaitu merakit reaktor. Merakit reaktor dilakukan sesuai urutan pengolahan yang dimulai dengan bak penampung awal dan kolom adsorpsi.

Pengambilan sampel air tanah. Sampel air tanah diambil di Lantai 3 Gedung Sipil Kampus Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

2.5.3 Proses running reaktor

Proses running reaktor dilakukan dengan mengalirkan air dari bak penampungan awal dengan bukaan keran yang telah diatur untuk mengatur debit yang keluar, agar didapatkan waktu adsorpsi yang diinginkan. Untuk variasi waktu T1 15 menit debit air yang masuk ke reaktor adalah 333 ml/menit; T2 30 menit debit air yang masuk ke reaktor adalah 166 ml/menit; dan T3 45 menit debit air yang masuk ke reaktor adalah 111 ml/menit. Kolom yang berisi media dilengkapi dengan kain saringan untuk mempermudah pergantian media. Proses ini dilakukan di Laboratorium Kualitas Air Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

2.5.4 Pengujian sampel air tanah

Pengujian sampel dilakukan sebelum dan setelah pengolahan dengan kolom adsorpsi dengan parameter yang diuji adalah besi (Fe) dan mangan (Mn). Pengujian dilakukan secara duplo agar tingkat keakuratan data yang didapatkan lebih baik. Sampel yang mewakili sebagai konsentrasi awal zat pencemar adalah sampel air tanah yang diambil secara langsung sebelum masuk ke kolom adsorpsi. Sedangkan, sampel yang mewakili sebagai konsentrasi akhir zat pencemar adalah sampel air yang keluar dari keran effluent reaktor. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium

Kualitas Air Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Metode pengujian dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Metode pengujian

No.	Parameter	Satuan	Acuan
1.	Fe	mg/l	SNI 06-4138-1996
2.	Mn	mg/l	SNI 06-4822-1998

Sumber: Badan Standarisasi Nasional

Besi (Fe). Metode pengujian besi (Fe) mengacu pada SNI 06-4138-1996 tentang Metode Pengujian Besi Terlarut Dalam Air Dengan Alat Spektrofotometer Menggunakan Fenantrolin. Fenantrolin bereaksi dengan ion Fe^{2+} untuk membentuk kompleks stabil berwarna merah-oranye. Warna yang dihasilkan oleh kompleks ini akan dibaca oleh spektrofotometri dengan panjang gelombang 510 nm dan absorbansinya akan menjadi acuan untuk menentukan konsentrasi besi.

Mangan (Mn). Metode pengujian mangan (Mn) mengacu pada SNI 06-4822-1998 tentang Metode Pengujian Kadar Mangan Dalam Air Spektrofotometer Secara Persulfat. Metode persulfat untuk pengujian mangan didasarkan pada oksidasi ion mangan (Mn^{2+}) menjadi bentuk permanganat (MnO_4^-) oleh ammonium persulfat $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ sebagai oksidator kuat, yang memiliki warna ungu dan dapat diukur secara spektrofotometri. Warna ini akan menjadi penentu konsentrasi mangan yang diukur absorbansinya pada panjang gelombang 525 nm.

2.6 Teknik Analisis Data

2.6.1 Analisa regresi linear berganda

Analisa regresi linear berganda digunakan untuk mengkaji pengaruh variabel independen terhadap variabel dependen. Regresi linear berganda merupakan model regresi yang melibatkan lebih dari satu variabel independen. Analisis regresi linear berganda dilakukan untuk mengetahui arah dan seberapa besar pengaruh variabel independen terhadap variabel dependen (Sudariana & Yoediana, 2022). Dalam metode analisis regresi linier berganda (*multiple regresion analyze method*) ada 2 (dua) hipotesis yang digunakan yaitu :

Uji-t. Uji-t digunakan untuk mengetahui apakah variabel-variabel independen memiliki pengaruh secara individual atau secara parsial terhadap variabel dependen. Dimana derajat signifikansi yang digunakan adalah 0,05. Apabila nilai signifikan lebih kecil dari derajat kepercayaan maka kita menerima hipotesis alternatif yang menyatakan bahwa variabel-variabel independen secara parsial mempengaruhi variabel dependen.

Uji-F. Uji-F digunakan untuk mengetahui apakah variabel-variabel independen memiliki pengaruh secara besamasama atau secara simultan terhadap variabel dependen. Dimana derajat signifikansi yang digunakan adalah 0,05. Apabila nilai signifikan lebih kecil dari derajat kepercayaan maka hipotesa alternatif diterima

yang menyatakan bahwa variabel-variabel independen secara simultan mempengaruhi variabel dependen.

2.6.2 Analisa efisiensi penyisihan

Analisa efisiensi penyisihan digunakan untuk menentukan efisiensi masing-masing jenis media adsorben dan waktu adsorpsi dalam menyisihkan Fe dan Mn.

$$\% \text{ penyisihan} = \frac{(C_{in} - C_{out})}{C_{in}} \times 100\%$$

2.7 Diagram Alir Penelitian



