

**TUGAS AKHIR - CL234801**

# **KINERJA ADSORBEN NZVI DAN $\text{SiO}_2$ DALAM PROSES PENYISIHAN ANTIBIOTIK ENROFLOXACIN**

**MAHARESMI LISTYA AZZAHRA**

**NRP 5014221029**

Dosen Pembimbing

**Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D**

**NIP 19730601 200003 1 001**

**Program Studi Sarjana Teknik Lingkungan**

Departemen Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2026





**TUGAS AKHIR - CL234801**

# **KINERJA ADSORBEN NZVI DAN $\text{SiO}_2$ DALAM PROSES PENYISIHAN ANTIBIOTIK ENROFLOXACIN**

**MAHARESMI LISTYA AZZAHRA**

**NRP 5014221029**

Dosen Pembimbing

**Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D**

**NIP 19730601200003 1 001**

**Program Studi Sarjana**

Departemen Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2026





**FINAL PROJECT - CL234801**

# **PERFORMANCE THE NZVI AND $\text{SiO}_2$ ADSORBENT IN THE REMOVAL OF THE ANTIBIOTIC ENROFLOXACIN**

**MAHARESMI LISTYA AZZAHRA**

**NRP 5014221029**

**Supervisor**

**Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D**

**NIP 19730601200003 1 001**

**Study Program Bachelor's Degree**

**Environmental Engineering Department**

**Faculty of Civil, Planning, and Geo Engineering**

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Surabaya**

**2026**



# LEMBAR PENGESAHAN

## KINERJA ADSORBEN NZVI DAN $\text{SiO}_2$ DALAM PROSES PENYISIHAN ANTIBIOTIK ENROFLOXACIN

### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat

Memperoleh gelar Sarjana Teknik pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **MAHARESMI LISTYA AZZAHRA**

NRP. 5014221029

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Adhi Yuniarto, ST., MT., Ph.D.

Pembimbing

2. Prof. Dr. Ali Masduqi, ST., MT.

Penguji

3. Dr. Isnri Arliyani, S.T.

Penguji

4. Welly Herumurti, S.T.

Penguji



Juli, 2026

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Maharesmi Listya Azzahra / 5014221029

Departemen : Teknik Lingkungan

Dosen Pembimbing / NIP : Adhi Yuniarto, ST., MT., Ph.D. / 19730601 200003 1 001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Kinerja Adsorben nZVI dan SiO<sub>2</sub> dalam Proses Penyisihan Antibiotik Enrofloxacin” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 24 Juli 2026

Mahasiswa

Mengetahui

Dosen Pembimbing



Adhi Yuniarto, ST., MT., Ph.D.

NIP. 19730601 200003 1 001



Maharesmi Listya Azzahra

NRP. 5014221029

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## ABSTRAK

### Kinerja Adsorben Komposit nZVI dan SiO<sub>2</sub> Dalam Proses Penyisihan Antibiotik Enrofloxacin

Nama Mahasiswa / NRP : Maharesmi Listya Azzahra / 5014221029  
Departemen : Teknik Lingkungan FTSPK - ITS  
Dosen Pembimbing : Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D

#### Abstrak

Kontaminasi residu antibiotik dalam limbah cair, khususnya dari sektor peternakan seperti enrofloxacin (ENR), menjadi masalah lingkungan serius karena sifatnya yang stabil secara kimia, sulit terurai secara alami, serta berpotensi menyebarkan gen resistensi antibiotik. Metode adsorpsi merupakan teknologi pengolahan yang unggul, di mana nanoscale zero valent iron (nZVI) sering digunakan sebagai media remediasi karena reaktivitasnya yang tinggi dan luas permukaan yang besar. Namun, nZVI murni memiliki keterbatasan berupa kecenderungan agregasi dan oksidasi cepat. Penelitian ini mengusulkan penggunaan silika (SiO<sub>2</sub>) sebagai adsorben alternatif yang berasal dari pemanfaatan limbah sandblasting dan juga penggunaan nZVI untuk dievaluasi kinerjanya dalam penyisihan ENR dari larutan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis karakterisasi material, menilai efektivitas penyisihan ENR, serta mengevaluasi pengaruh pH dan waktu kontak dalam proses adsorpsi. Karakterisasi material dilakukan melalui uji Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-Ray (EDX), Fourier Transform Infrared (FTIR), dan Brunauer Emmett Teller (BET). Pengujian adsorpsi dilakukan menggunakan *batch* sistem dengan variasi pH (3, 4, dan 5), konsentrasi ENR (2, 5, dan 10 mg/L), dan waktu pengambilan sampel hingga 60 menit. Analisis performa fotokatalisis dilakukan dengan spektrofotometri UV-Vis dan dikonfirmasi menggunakan *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) untuk memberikan ketelitian yang lebih tinggi.

Hasil pengamatan fisik menunjukkan bahwa silika (SiO<sub>2</sub>), nZVI, dan komposit nZVI-SiO<sub>2</sub> yang berhasil disintesis berwarna putih, coklat tua, dan hitam pekat. Hasil dari uji karakteristik baru dilakukan untuk material Silika (SiO<sub>2</sub>). Hasil dari uji SEM diketahui ukuran rata-rata partikel SiO<sub>2</sub>, nZVI, dan komposit nZVI-SiO<sub>2</sub> masing-masing sebesar 47366 nm, 1630 nm, dan 10940 nm. Pada material silika (SiO<sub>2</sub>) luas permukaan spesifik 278,721 m<sup>2</sup>/g dan diameter pori 0,76 cm<sup>3</sup>/g. *Removal efficiency* silika (SiO<sub>2</sub>) terhadap larutan ENR optimal pada konsentrasi 5 mg/L dengan nilai 96,18%. Sedangkan pada material nZVI memiliki *removal efficiency* sebesar 77,82% pada konsentrasi 5 mg/L pada pH 3. Plot isothermal adsorpsi pada material silika mengikuti model isothermal Freundlich yang menunjukkan bahwa adsorpsi berlangsung pada permukaan heterogen. Kinetika adsorpsi pada material silika mengikuti model pseudo second order, yang mengindikasikan bahwa proses adsorpsi dikendalikan oleh mekanisme kimia (*chemisorption*).

**Kata kunci:** *Adsorpsi, ENR, Komposit, Nanoscale Zero-Valent Iron (nZVI), Silika Oksida (SiO<sub>2</sub>)*

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## ABSTRACT

### Performance The nZVI And SiO<sub>2</sub> Adsorbent In The Removal Of The Antibiotic Enrofloxacin

**Nama Mahasiswa / NRP** : Maharesmi Listya Azzahra / 5014221029  
**Departemen** : Teknik Lingkungan FTSPK - ITS  
**Dosen Pembimbing** : Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D

#### Abstract

Antibiotic residue contamination in wastewater, particularly from the livestock sector such as enrofloxacin (ENR) poses a serious environmental problem due to its chemical stability, resistance to natural degradation, and potential to spread antibiotic resistance genes. Adsorption is a superior treatment technology, in which nanoscale zero valent iron (nZVI) is often used as a remediation medium due to its high reactivity and large surface area. However, pure nZVI has limitations in the form of a tendency to aggregate and undergo rapid oxidation. This study proposes the use of silica (SiO<sub>2</sub>) as an alternative adsorbent derived from sandblasting waste, as well as the use of nZVI, to evaluate their performance in removing ENR from solutions.

The objectives of this study are to analyze material characterization, assess the effectiveness of ENR removal, and evaluate the effects of pH and contact time on the adsorption process. The research methods included the synthesis of nanocomposites using an in-situ technique. Material characterization was performed using Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-Ray (EDX), Fourier Transform Infrared (FTIR), and Brunauer-Emmett-Teller (BET). Adsorption testing was conducted using a batch system with variations in pH (3, 4, and 5), ENR concentration (2, 5, and 10 mg/L), and sampling time up to 60 minutes. Photocatalytic performance analysis was performed using UV-Vis spectrophotometry and confirmed using High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) to ensure higher precision.

Physical observations showed that the successfully synthesized silica (SiO<sub>2</sub>), nZVI, and nZVI-SiO<sub>2</sub> composite were white, dark brown, and jet black, respectively. New characterization tests were conducted on the silica (SiO<sub>2</sub>) material. SEM test results revealed that the average particle sizes of SiO<sub>2</sub>, nZVI, and the nZVI-SiO<sub>2</sub> composite were 47,366 nm, 1,630 nm, and 10,940 nm, respectively. For the silica (SiO<sub>2</sub>) material, the specific surface area was 278.721 m<sup>2</sup>/g and the pore volume was 0.76 cm<sup>3</sup>/g. The removal efficiency of silica (SiO<sub>2</sub>) for ENR solutions was optimal at a concentration of 5 mg/L, with a value of 96.18%. Meanwhile, nZVI exhibits a removal efficiency of 77.82% at a concentration of 5 mg/L at pH 3. The adsorption isotherm plot for silica follows the Freundlich isotherm model, indicating that adsorption occurs on a heterogeneous surface. The adsorption kinetics of the silica material follow the pseudo-second-order model, indicating that the adsorption process is controlled by a chemical mechanism (chemisorption).

**Keywords:** *Adsorption, ENR, Composite, Nanoscale Zero-Valent Iron (nZVI), Silicon Dioxide (SiO<sub>2</sub>)*

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Proposal Tugas Akhir berjudul “ Kinerja Adsorben nZVI dan SiO<sub>2</sub> dalam Proses Penyisihan Antibiotik ENR”. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan Pendidikan S1 Program Sarjana Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Dengan penuh rasa hormat, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang selalu sabar dan penuh kesungguhan membimbing penulis hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ali Masduqi S.T., M.T., Bapak Welly Herumurti, S.T., M.Sc., dan Ibu Dr.Isni Arliyani, S.T. Selaku dosen pengarah yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta saran yang sangat membantu penulis selama proses penyusunan tugas akhir ini hingga selesai dengan baik.
3. Bapak Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST., MEPM. selaku dosen wali yang telah banyak memberikan bimbingan selama masa perkuliahan.
4. Seluruh dosen dan tenaga kependidikan Departemen Teknik Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang telah memberikan ilmu pengetahuan, pengalaman, dan pelayanan yang baik selama penulis menempuh pendidikan.
5. Keluarga tercinta yang tidak henti-hentinya memberikan dukungan moral maupun materi, serta menjadi motivasi terbesar bagi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Teman-teman Teknik Lingkungan ITS Angkatan 2022 yang telah berjuang bersama dalam menjaga kesehatan fisik, mental, dan senantiasa berusaha memberikan yang terbaik dalam penyelesaian tugas akhir ini.
7. Yuliyanti Nurjannah selaku sahabat penulis yang selalu memberi dukungan, doa, motivasi, bantuan, serta kebersamaan yang diberikan selama proses penelitian dan penyusunan tugas akhir.
8. Teman-teman SMA Shafira Jolita dan Putri Dwi yang senantiasa mendukung, menghibur dan memberi semangat kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Teman-teman dekat dari maba yang selalu memberikan semangat, dukungan, dan menemani proses penyusunan tugas akhir, khususnya melalui kebersamaan saat mengerjakan tugas akhir di Kopi Kenangan. Terima kasih atas setiap cerita, tawa, dan motivasi yang telah diberikan.
10. Kepada segenap pihak yang telah memberikan bantuan dalam bentuk fisik maupun moril demi kelancaran pengerjaan tugas akhir yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa karya ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk perbaikan ke depan. Semoga tugas akhir ini bermanfaat sebagai referensi akademik maupun inspirasi penelitian selanjutnya. Akhir kata, penulis memohon agar segala kebaikan yang diberikan semua pihak mendapat balasan keberkahan dari Allah SWT.

Surabaya, Juli 2026

Penulis

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR ISI

|                                                            |                                     |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| LEMBAR PENGESAHAN .....                                    | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| PERNYATAAN ORISINALITAS .....                              | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| ABSTRAK .....                                              | v                                   |
| ABSTRACT .....                                             | vii                                 |
| KATA PENGANTAR .....                                       | ix                                  |
| DAFTAR ISI .....                                           | xi                                  |
| DAFTAR GAMBAR .....                                        | xiii                                |
| DAFTAR TABEL .....                                         | xv                                  |
| BAB 1 PENDAHULUAN .....                                    | 1                                   |
| 1.1 Latar Belakang .....                                   | 1                                   |
| 1.2 Rumusan Masalah .....                                  | 2                                   |
| 1.3 Batasan Masalah .....                                  | 3                                   |
| 1.4 Tujuan .....                                           | 3                                   |
| 1.5 Manfaat .....                                          | 3                                   |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....                               | 5                                   |
| 2.1 Hasil Penelitian Terdahulu .....                       | 5                                   |
| 2.2 Enrofloxacin (ENR) .....                               | 6                                   |
| 2.3 Nanoscale Zero-Valent Iron (nZVI) .....                | 8                                   |
| 2.4 Silika (SiO <sub>2</sub> ) .....                       | 9                                   |
| 2.5 Adsorpsi .....                                         | 10                                  |
| 2.5.1 Mekanisme Adsorpsi .....                             | 10                                  |
| 2.5.2 Jenis Adsorpsi, Faktor Adsorpsi, dan Aktivitas ..... | 11                                  |
| 2.5.3 Kinetika Adsorpsi .....                              | 12                                  |
| 2.5.3 <i>Isoterm</i> Adsorpsi .....                        | 13                                  |
| 2.6 Uji Karakterisasi .....                                | 15                                  |
| 2.6.1 Scanning Electron Microscopy (SEM) .....             | 15                                  |
| 2.6.2 Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) .....     | 15                                  |
| 2.6.3 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ..... | 15                                  |
| 2.6.4 Analisis BET .....                                   | 16                                  |
| 2.7 Limbah Sandblasting .....                              | 16                                  |
| BAB 3 METODOLOGI .....                                     | 17                                  |
| 3.1 Kerangka Penelitian .....                              | 17                                  |
| 3.1.1 Ide Penelitian .....                                 | 19                                  |

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.2 Studi Literatur.....                                             | 19 |
| 3.1.3 Variabel dan Parameter Penelitian .....                          | 19 |
| 3.2 Bahan dan peralatan yang digunakan .....                           | 19 |
| 3.2.1 Alat Penelitian .....                                            | 19 |
| 3.2.2 Bahan Penelitian.....                                            | 20 |
| 3.3 Pelaksanaan penelitian .....                                       | 20 |
| 3.3.1 Sintesis dan Uji Material .....                                  | 20 |
| 3.3.2 Uji Adsorpsi .....                                               | 22 |
| 3.3.3 Analisis Data dan Pembahasan.....                                | 23 |
| 3.3.4 Kesimpulan dan Saran.....                                        | 23 |
| BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....                                       | 25 |
| 4.1 Sintesis Material .....                                            | 25 |
| 4.2 Karakterisasi Hasil Material .....                                 | 26 |
| 4.2.1 Analisis Scanning Electron Microscopy (SEM).....                 | 26 |
| 4.2.2 Analisis <i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> (EDX) ..... | 30 |
| 4.2.3 <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR).....       | 33 |
| 4.2.4 Analisis <i>Brunauer-Emmet-Teller</i> (BET) .....                | 34 |
| 4.3. Penentuan Kurva Kalibrasi ENR.....                                | 35 |
| 4.4 Hasil Analisis HPLC Enrofloxacin .....                             | 35 |
| 4.5 Pengaruh pH .....                                                  | 36 |
| 4.6 Analisis Hasil Uji Adsorpsi .....                                  | 38 |
| 4.6.1 Perhitungan Konsentrasi ENR setelah Proses Adsorpsi.....         | 38 |
| 4.5.2 Analisis Isotermal Adsorpsi .....                                | 47 |
| 4.5.3 Analisis Kinetika Adsorpsi.....                                  | 49 |
| BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....                                       | 52 |
| 5.1 Kesimpulan.....                                                    | 53 |
| 5.2 Saran .....                                                        | 53 |
| DAFTAR PUSTAKA.....                                                    | 55 |
| LAMPIRAN A PELAKSANAAN ANALISIS .....                                  | 63 |
| LAMPIRAN B HASIL PERHITUNGAN ADSORPSI.....                             | 65 |
| LAMPIRAN C KARAKTERISASI.....                                          | 67 |
| BIODATA PENULIS.....                                                   | 87 |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2. 1 Struktur Kimia ENR.....                                                                                                                            | 7  |
| Gambar 2. 2 Mekanisme Adsorpsi yang Mungkin Terjadi.....                                                                                                       | 10 |
| Gambar 2. 3 Penyerapan Molekul Gas Nitrogen oleh Permukaan Serat Padat .....                                                                                   | 16 |
| Gambar 3.1 Kerangka Penelitian .....                                                                                                                           | 19 |
| Gambar 3.2 Contoh Skema Uji Adsorpsi .....                                                                                                                     | 22 |
| Gambar 4.1 Morfologi Permukaan SiO <sub>2</sub> (a) Perbesaran 1000x (b) Perbesaran 50.000x ..                                                                 | 27 |
| Gambar 4.2 Morfologi Permukaan nZVI (a) Perbesaran 5000x (b) Perbesaran 30.000x .                                                                              | 27 |
| Gambar 4.3 Morfologi Permukaan Komposit nZVI-SiO <sub>2</sub> (a) Perbesaran 1500x (b) Perbesaran 10.000x .....                                                | 27 |
| Gambar 4.4 Aglomerasi Partikel Silika pada Metode Sol-Gel .....                                                                                                | 28 |
| Gambar 4.5 Distribusi Ukuran Partikel Material Silika.....                                                                                                     | 29 |
| Gambar 4.6 Distribusi Ukuran Partikel Komposit nZVI.....                                                                                                       | 29 |
| Gambar 4.7 Distribusi Ukuran Partikel Komposit nZVI-SiO <sub>2</sub> .....                                                                                     | 29 |
| Gambar 4.8 Hasil EDX mapping material Silika Perbesaran 20.000x .....                                                                                          | 30 |
| Gambar 4.9 Hasil EDX mapping Komposit nZVI.....                                                                                                                | 31 |
| Gambar 4.10 Hasil EDX mapping Komposit nZVI-SiO <sub>2</sub> .....                                                                                             | 32 |
| Gambar 4.11 Hasil Uji FTIR Material .....                                                                                                                      | 33 |
| Gambar 4.12 Grafik Isoterm Adsorpsi-Desorpsi Silika.....                                                                                                       | 34 |
| Gambar 4.13 Kurva Kalibrasi ENR .....                                                                                                                          | 35 |
| Gambar 4.14 Penentuan pH-pzc SiO <sub>2</sub> .....                                                                                                            | 36 |
| Gambar 4.15 Penentuan pH-pzc nZVI.....                                                                                                                         | 38 |
| Gambar 4.16 (a) Efisiensi Penyisihan dan (b) Kapasitas Adsorpsi Silika terhadap Enrofloxacin pada Konsentrasi 2 mg/L dengan Variasi pH dan Waktu Kontak .....  | 39 |
| Gambar 4.17 (a) Efisiensi Penyisihan dan (b) Kapasitas Adsorpsi nZVI terhadap Enrofloxacin pada Konsentrasi 2 mg/L dengan Variasi pH dan Waktu Kontak .....    | 40 |
| Gambar 4.18 (a) Efisiensi Penyisihan dan (b) Kapasitas Adsorpsi Silika terhadap Enrofloxacin pada Konsentrasi 5 mg/L dengan Variasi pH dan Waktu Kontak .....  | 41 |
| Gambar 4.19 (a) Efisiensi Penyisihan dan (b) Kapasitas Adsorpsi nZVI terhadap Enrofloxacin pada Konsentrasi 5 mg/L dengan Variasi pH dan Waktu Kontak .....    | 42 |
| Gambar 4.20 (a) Efisiensi Penyisihan dan (b) Kapasitas Adsorpsi Silika terhadap Enrofloxacin pada Konsentrasi 10 mg/L dengan Variasi pH dan Waktu Kontak ..... | 43 |
| Gambar 4.21 (a) Efisiensi Penyisihan dan (b) Kapasitas Adsorpsi nZVI terhadap Enrofloxacin pada Konsentrasi 10 mg/L dengan Variasi pH dan Waktu Kontak .....   | 45 |
| Gambar 4.22 Perbandingan Hasil Adsorpsi nZVI dan Silika .....                                                                                                  | 45 |
| Gambar 4. 23 Perbandingan Hasil Kapasitas Adsorpsi nZVI dan Silika .....                                                                                       | 46 |
| Gambar 4. 24 Isotermal Langmuir Silika .....                                                                                                                   | 48 |
| Gambar 4. 25 Isotermal Freundlich Silika .....                                                                                                                 | 48 |
| Gambar 4. 26 Pseudo First Order Silika .....                                                                                                                   | 50 |
| Gambar 4. 27 Pseudo Second Order Silika.....                                                                                                                   | 50 |

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR TABEL

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu nZVI- SiO <sub>2</sub> .....                  | 5  |
| Tabel 2. 2 Penelitian Terdahulu ENR .....                                     | 5  |
| Tabel 2. 3 Karakteristik ENR.....                                             | 7  |
| Tabel 3.1 Matriks Variasi Percobaan.....                                      | 23 |
| Tabel 4.1 Hasil Pengamatan Fisik Material Sintesis .....                      | 26 |
| Tabel 4.2 Komposisi Unsur Material Silika .....                               | 30 |
| Tabel 4.3 Komposisi Unsur Material Komposit nZVI .....                        | 31 |
| Tabel 4.4 Komposisi Unsur Material Komposit nZVI-SiO <sub>2</sub> .....       | 32 |
| Tabel 4.5 Konsentrasi Hasil Pengukuran HPLC.....                              | 35 |
| Tabel 4.6 Hasil Pengujian dan Analisis pH-pzc Material SiO <sub>2</sub> ..... | 36 |
| Tabel 4.7 Hasil Pengujian dan Analisis pH-pzc Material nZVI .....             | 37 |
| Tabel 4. 8 Hasil Adsorpsi Silika Pada Konsentrasi 2 mg/L.....                 | 38 |
| Tabel 4. 9 Hasil Adsorpsi nZVI Pada Konsentrasi 2 mg/L .....                  | 40 |
| Tabel 4.10 Hasil Adsorpsi Silika Pada Konsentrasi 5 mg/L.....                 | 41 |
| Tabel 4.11 Hasil Adsorpsi nZVI Pada Konsentrasi 5 mg/L .....                  | 42 |
| Tabel 4.12 Hasil Adsorpsi Silika Pada Konsentrasi 10 mg/L.....                | 43 |
| Tabel 4.13 Hasil Adsorpsi nZVI Pada Konsentrasi 10 mg/L .....                 | 44 |

*”Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Akses terhadap air bersih merupakan kebutuhan fundamental bagi keberlangsungan hidup manusia, akan tetapi saat ini ketersediaan air minum yang layak hanya tersisa sekitar 1% menurut norma dunia karena berbagai polutan dari aktivitas antropogenik seperti pembuangan limbah industri dan domestik (Nayak *et al.*, 2023). Salah satu masalah lingkungan yang cukup serius secara global dalam beberapa decade terakhir yaitu adanya kontaminasi residu antibiotik dalam limbah cair, khususnya yang bersumber dari sektor peternakan dan budidaya perairan. Masalah ini menjadi signifikan karena sekitar 30-90% antibiotik yang digunakan baik manusia maupun hewan akan dibuang kembali ke lingkungan melalui urin dan feses dalam kondisi tidak termetabolisme sepenuhnya, sehingga menyebabkan masih tersisnya residu antibiotik yang tidak dikelola dengan baik dan menyebabkan eutrofikasi, mengganggu keseimbangan ekosistem perairan, serta mempercepat penyebaran gen resistensi antibiotik (ARGs) yang membahayakan kesehatan masyarakat (Zhang *et al.*, 2025).

Antibiotik yang berada di lingkungan termasuk jenis senyawa yang sangat berbahaya yang menyebabkan kontaminasi lingkungan perairan karena sifatnya yang persisten. Beberapa antibiotik seperti fluoroquinolone, lincomycin, sulfonamida, dan tetrasiklin banyak digunakan dalam peternakan, farmasi, dan produk metabolisme untuk menyembuhkan dan mengobati penyakit infeksi mikroba. Banyaknya senyawa aktif farmasi (PhACs) yang telah dilepaskan ke lingkungan tanpa diolah dengan benar dan penggunaannya yang berlebihan, polutan ini dapat menyebabkan masalah pada lingkungan (Janjhi *et al.*, 2023). Salah satu antibiotik golongan fluoroquinolone yaitu ENR yang mempunyai spektrum luas digunakan dalam kedokteran hewan maupun pengobatan berbagai penyakit infeksi bakteri pada hewan ternak. Salah satu permasalahan di sektor peternakan adalah adanya penyakit infeksius pada hewan. Penyakit pada hewan dapat mempengaruhi penurunan produktivitas hingga menyebabkan kematian pada hewan. Antibiotik yang dapat diberikan pada hewan salah satunya adalah antibiotik golongan fluorokuinolon. Fluorokuinolon dapat digunakan untuk penanganan penyakit pada unggas, sapi, kambing, domba, babi, kuda dan ikan (Widiyanti *et al.*, 2019). Salah satu jenis antibiotik golongan fluorokuinolon adalah ENR. Secara umum ENR banyak digunakan dalam peternakan, dengan konsentrasi yang terdeteksi berada di lingkungan bervariasi dari 0,01-262,16 µg/L. Paparan pada konsentrasi serendah 20 µg/L terbukti dapat memicu mutasi genetik (seperti pada gen *gyrA*) yang menyebabkan resistensi terhadap golongan fluoroquinolone (Huang *et al.*, 2026) Pada studi kasus yang ada di Indonesia perairan di waduk cirata, pencemaran antibiotik pada perairan tersebut terdeteksi pada saat musim hujan dengan rata-rata konsentrasi ENR sebanyak 23 ng/L, sedangkan kandungan residu ENR yang ada pada sedimen jauh lebih tinggi yaitu mencapai rata-rata 9-10 µg/kg (Ariyani *et al.*, 2024). Mengingat sifatnya yang stabil secara kimia dan sulit terurai secara alami, diperlukan teknologi pengolahan yang efisien untuk menyisihkan ENR dari air limbah (Dai *et al.*, 2023).

Metode adsorpsi dianggap sebagai teknologi pengolahan yang unggul karena biayanya yang relatif rendah, efektivitas yang tinggi, kemudahan operasi, serta kemampuannya menyisihkan polutan pada konsentrasi rendah (ng/L hingga mg/L) keberhasilan teknologi ini bergantung pada efektivitas material adsorben yang digunakan (Nayak *et al.*, 2023). Salah satu adsorben yang memiliki biaya yang hemat dan ramah lingkungan baru-baru ini digunakan sebagai remediasi lingkungan yaitu menggunakan material nZVI (*nanoscale zero-valent iron*) karena memiliki reaktivitasnya yang tinggi, luas permukaan yang besar, serta kemampuan

reduksi yang kuat terhadap berbagai kontaminan organik dan logam berat yang secara kimia mereduksi polutan menjadi endapan yang kurang berbahaya (Namakka *et al.*, 2024) nZVI memiliki struktur yang unik berupa *core-shell*, yang intinya terdiri dari besi metalik ( $\text{Fe}^0$ ) sebagai sumber elektron, sedangkan cangkangnya berupa lapisan oksida besi yang menghubungkan interaksi elektrostatis dan kemisorpsi. Namun, penggunaan nZVI murni memiliki keterbatasan yaitu kecenderungannya untuk mengalami agregasi (penggumpalan) dan oksidasi cepat saat terpapar udara atau air, yang dapat menurunkan reaktivitas dan menghambat proses adsorpsi (Rezasyah Alifiadi & Agus Slamet, 2022).

Terlepas dari sifat material nZVI dalam aplikasi remediasi lingkungan, faktor pembatas seperti pasivasi cepat dan aglomerasi partikel yang menghambat dispersibilitas dan kinerja keseluruhannya perlu diatasi. Para peneliti telah menyelidiki penggabungan dari nZVI dengan material fungsional lainnya seperti kitosan (CS), silika ( $\text{SiO}_2$ ), dan titanium dioksida ( $\text{TiO}_2$ ), dengan memanfaatkan efek sinergisnya untuk mengatasi kerentanan material nZVI terhadap oksidasi cepat dan meningkatkan kinerja secara keseluruhan (Guan *et al.*, 2015). Penggunaan material pendukung seperti silika ( $\text{SiO}_2$ ) telah digunakan sebagai strategi untuk menstabilkan nZVI.  $\text{SiO}_2$  dikenal karena sifat adsorpsinya yang sangat baik dan kemampuannya untuk menstabilkan nZVI.  $\text{SiO}_2$  yang digunakan yaitu dari limbah sandblasting. Limbah sandblasting memiliki kandungan  $\text{SiO}_2$  yang cukup tinggi yaitu sebesar 55,30- 99,87%. Penggunaan limbah ini digunakan sebagai sumber pembuatan  $\text{SiO}_2$  karena jumlah timbulan limbah sandblasting yang mengandung banyak kandungan logam berat dan dikategorikan sebagai limbah B3 sehingga jika tidak diolah dan meminimasi dampak pencemarannya akan mencemari lingkungan dan mengganggu kesehatan manusia.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan sebelumnya telah mengeksplorasi penggunaan nanoscale zero valent iron (nZVI) dan silika ( $\text{SiO}_2$ ) sebagai adsorben untuk pengolahan air limbah, dan hasilnya menunjukkan bahwa kedua material tersebut memiliki potensi yang signifikan dalam menyisihkan berbagai jenis polutan (Namakka *et al.*, 2024). nZVI dikenal memiliki reaktivitas tinggi dan luas permukaan besar yang menjadikannya efektif sebagai media remediasi, meskipun memiliki keterbatasan berupa kecenderungan agregasi dan oksidasi cepat yang dapat menurunkan kinerjanya. Di sisi lain,  $\text{SiO}_2$  memiliki porositas yang baik, sifat hidrofilik, biokompatibilitas tinggi, serta kelimpahan gugus hidroksil ( $-\text{OH}$ ) di permukaannya, menjadikannya adsorben alternatif yang potensial, khususnya jika bersumber dari pemanfaatan limbah. Meskipun potensi kedua material tersebut telah terbukti dapat digunakan dalam berbagai aplikasi remediasi lingkungan, penelitian yang secara spesifik mengevaluasi kinerjanya dalam proses penyisihan antibiotik ENR masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki efektivitas adsorben nZVI dan  $\text{SiO}_2$  secara mandiri dalam mereduksi ENR dalam larutan. Penelitian ini mencakup karakterisasi material melalui uji Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-Ray (EDX), Fourier Transform Infrared (FTIR), dan BET, serta optimasi parameter adsorpsi seperti pH, dosis adsorben, dan waktu kontak. Diharapkan hasil penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan nanoteknologi yang lebih stabil dan efisien dalam menangani permasalahan limbah antibiotik di perairan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dapat disusun rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakterisasi material nZVI,  $\text{SiO}_2$ , dan nZVI- $\text{SiO}_2$  sebagai media adsorpsi?

2. Bagaimana efektivitas material nZVI, dan SiO<sub>2</sub> dalam mereduksi konsentrasi residu ENR pada variasi pH dan konsentrasi awal?

### 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Penelitian skala laboratorium untuk menyintesis material nZVI dan SiO<sub>2</sub> beserta karakteristiknya
2. Sistem operasi yang digunakan adalah *batch system*
3. Air limbah yang digunakan adalah air limbah artificial larutan ENR
4. Analisis karakteristik material menggunakan uji Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX), dan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Brunauer Emmett Teller (BET)
5. Analisis performa katalis menggunakan uji UV-Vis, High Performance Liquid Chromatography (HPLC).
6. Variasi yang digunakan dalam penelitian:
  - Komposit yang digunakan adalah nZVI, SiO<sub>2</sub>, dan campuran dari nZVI- SiO<sub>2</sub>
  - Konsentrasi awal ENR adalah 2, 5, dan 10 mg/L
  - Larutan ENR dikondisikan terlebih dahulu dengan variasi pH 3, 4, dan 5

### 1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan karakteristik material nZVI, SiO<sub>2</sub>, dan nZVI- SiO<sub>2</sub> sebagai media adsorpsi.
2. Menentukan efektivitas material nZVI, dan SiO<sub>2</sub> dalam mereduksi konsentrasi residu ENR pada variasi pH dan konsentrasi awal.

### 1.5 Manfaat

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan dalam pengembangan penelitian terhadap adsorben nZVI dan juga SiO<sub>2</sub> dari limbah sandblasting, serta penerapan pada pengolahan limbah cair peternakan khususnya pada konsentrasi ENR.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang digunakan untuk menelaah perkembangan penelitian yang relevan dengan pemanfaatan nZVI-SiO<sub>2</sub> sebagai adsorben. Penelaahan tersebut bertujuan untuk mengidentifikasi persamaan dan perbedaan dengan penelitian yang dilakukan serta menemukan kesenjangan penelitian yang menjadi dasar dan referensi pelaksanaan penelitian ini. Penelitian yang telah dilakukan terkait pemanfaat nZVI- SiO<sub>2</sub> dan ENR dapat dilihat pada tabel 2.1 dan tabel 2.2

**Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu nZVI- SiO<sub>2</sub>**

| No | Penelitian                                                                                                                                                                      | Metode                                                                                                                                                                      | Hasil                                                                                                                             |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Synthesis of Silica-supported Nanoiron for Cr(VI) Removal: Application of Box-Behnken Statistical Design (BBD) (Archariyapanyakul <i>et al.</i> , 2017)                         | Metode impregnasi koloid (in-situ colloidal impregnation) dengan optimasi Box-Behnken Design (BBD), Pembuatan sintesis komposit nZVI-SiO <sub>2</sub> dengan metode in-situ | Efisiensi penyisihan Kromium VI (Cr(VI)) mencapai 98% pada pH 7 dan 94,41% pada pH 10 dalam waktu 60 menit                        |
| 2  | Reduction of Ciprofloxacin Concentration in Wastewater Treatment Plant Effluent Using nZVI-MXene (Fairuzi <i>et al.</i> , 2025)                                                 | Metode reduksi kimia untuk mensintesis komposit nZVI-MXene (rasio 2:1)                                                                                                      | Penyisihan antibiotik Siprofloksasin (CPFX) mencapai efisiensi optimal 94% pada konsentrasi 100 mg/L dengan waktu kontak 30 menit |
| 3  | Application of Novel Amino-Functionalized nZVI@SiO <sub>2</sub> Nanoparticles to Enhance Anaerobic Granular Sludge Removal of 2,4,6-Trichlorophenol (Guan <i>et al.</i> , 2015) | Metode one-step liquid-phase dengan fungsionalisasi amino (nZVI@SiO-NH <sub>2</sub> )                                                                                       | Lebih dari 94,6% 2,4,6-Trichlorophenol (TCP) berhasil disisihkan dalam sistem lumpur granular anaerobik                           |

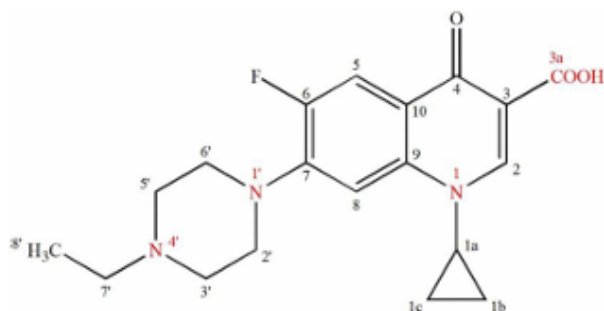
**Tabel 2. 2 Penelitian Terdahulu ENR**

| No | Penelitian                                                                                                      | Metode                                                                                         | Hasil                                                                                 |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Sintesis Komposit Hydrochar Sabut Kelapa@O-Doped Graphitic Carbon Nitride (HC@OCN) Sebagai Material Fotokatalis | Menggunakan HC@OCN (Hydrochar Sabut Kelapa @O-doped Graphitic Carbon Nitride sebagai adsorben. | Mencapai efisiensi degradasi sebesar 93,84% dalam waktu 60 menit pada kondisi optimal |

|   |                                                                                                                                                      |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                       |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | untuk Mendegradasi ENR (Sari, 2025)                                                                                                                  |                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                       |
| 2 | A mechanistic insight into ENR sorptive affinity of chemically activated carbon engineered from green coconut shell (Dassharma <i>et al.</i> , 2020) | Penggunaan karbon aktif dari tempurung kelapa muda (BGCSC) untuk mereduksi ENR dengan metode uji bets skala laboratorium | Persentase penyisihan tertinggi sebesar 97,58% pada konsentrasi awal ENR 10 mg/L, pH 6, suhu 25°C, dosis adsorben 3 g/L, kecepatan pengadukan 140 rpm, dan waktu kontak selama 9 jam. |

## 2.2 Enrofloxacin (ENR)

ENR merupakan antibiotik berspektrum luas yang termasuk turunan golongan fluoroquinolone dan digunakan sebagai obat infeksi gastrointestinal dan pernafasan untuk bakteri gram positif dan bakteri gram negatif pada hewan (Ramadhan *et al.*, 2025). Fluoroquinolon diklasifikasikan sebagai kelompok antimikroba yang sangat penting oleh organisasi kesehatan hewan dunia. Di Uni Eropa, ENR diklasifikasikan sebagai antimikroba kategori B. Hal ini berarti penggunaannya hanya diperbolehkan jika antimikroba kategori C dan D tidak efektif secara klinis, dan penggunaannya harus didasarkan pada hasil uji kepekaan antibiotik (AST) (Ambros *et al.*, 2025). ENR merupakan antibiotik fluoroquinolon generasi kedua dengan mekanisme kerja menghambat DNA gyrase bakteri. Obat ini merupakan penghambat kuat enzim DNA Topoisomerase II (Gyrase) dan DNA Topoisomerase IV (Topo IV) yang merupakan enzim esensial yang terlibat dalam proses seluler kunci termasuk replikasi DNA. Selain itu, pada spesies mamalia dan non-mamalia, ENR sebagian di metabolisme di hati menjadi ciprofloxacin, metabolit utamanya adalah cyclopropyl yang juga merupakan agen antimikroba yang kuat (Polveiro *et al.*, 2020). Dengan cara kerjanya yang menghambat DNA Topoisomerase II (Gyrase) dan DNA Topoisomerase IV (Topo IV), dapat menghasilkan efek sitotoksik dalam sel target. Mekanisme kerja dari enrofloksasin berbeda dengan antimikroba lainnya seperti golongan beta laktam, makrolida, tetrasiklin dan aminoglikosida. Enrofloksasin mengandung ikatan fluor di tengah struktur kimianya. Gugus fluorida telah diketahui bersifat neurotoksik dan obat yang menempel pada gugus fluorida dapat berpenetrasi ke dalam jaringan yang sensitif termasuk otak. Kemampuan fluorida untuk menembus blood-brain barrier, membuat fluorida bersifat neurotoksik kuat (Widiyanti *et al.*, 2019). ENR dapat dianalisis menggunakan beberapa metode uji, antara lain potensiometri, PLC, HPLC-FLD, UHPLC, ELISA, imunokromatografi, dan spektrofotometer UV-Vis (Rohana & Rizqy Prabhata, 2023). Dikarenakan bioavailabilitasnya yang sangat baik, ENR (ENR) dengan cepat diserap oleh tubuh hewan melalui ekskresi ginjal. Akan tetapi, penggunaan ENR pada manusia hingga saat ini belum mendapatkan persetujuan karena adanya potensi risiko efek samping yang berbahaya, seperti gangguan gastrointestinal, efek samping serius lainnya seperti tendinitis, ruptur tendon, gangguan sistem saraf pusat, dan efek teratogenik (Shang *et al.*, 2023). Struktur kimia ENR dapat dilihat pada gambar berikut:



**Gambar 2. 1 Struktur Kimia ENR**

Sumber: (Pei *et al.*, 2020)

Struktur kimia-nya terdiri dari cincin kuinolon sebagai struktur esensial untuk aksi antibakteri, atom fluor pada posisi C<sub>6</sub> untuk meningkatkan permeabilitas dinding sel bakteri, serta gugus etil pada cincin piperazin untuk meningkatkan lipofilisitas. Karena atom karboksilnya yang bersifat asam dan atom nitrogennya yang bersifat basa, ENR bersifat asam dan basa sehingga kelarutannya sangat bergantung pada pelarut dan nilai pH (Pei *et al.*, 2020).

Karakteristik antibiotik ENR dijelaskan pada tabel berikut:

**Tabel 2. 3 Karakteristik ENR**

| Karakteristik ENR |                                                                                                                                              |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Molekul Formula   | C <sub>19</sub> H <sub>22</sub> FN <sub>3</sub> O <sub>3</sub>                                                                               |
| Nama IUPAC        | 1-cyclopropyl-7-(4-ethylpiperazin-1-yl)-6-fluoro-4-oxoquinoline-3-carboxylic acid                                                            |
| Bentuk            | Padatan                                                                                                                                      |
| Berat Molekul     | 359,4 g/mol                                                                                                                                  |
| Kelarutan         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Larut dalam klorofom</li> <li>- Sedikit larut dalam air</li> <li>- Larut dalam KOH encer</li> </ul> |
| Titik Lebur       | 225 °C                                                                                                                                       |
| Penyimpanan       | -20°C                                                                                                                                        |

Sumber: Database PubChem, 2026

- **Penilaian Resiko dan Pengaruh ENR di Lingkungan**

ENR adalah antibiotik hewan yang paling banyak digunakan terutama pada sektor medis dan pertanian yang meninggalkan residu ENR dalam jumlah besar dan terbuang di lingkungan perairan melalui saluran limbah. ENR memiliki stabilitas kimia yang tinggi dan toksisitas biologis yang kuat, sehingga keberadaannya menjadi ancaman serius bagi sistem ekologi dan kesehatan manusia. Karena sifatnya yang sulit terurai secara alami, ENR dikategorikan sebagai kontaminan organik yang persisten (Lin *et al.*, 2026). Sekitar 70-80% antibiotik yang dikonsumsi dikeluarkan dari tubuh dalam bentuk aslinya. Residu dari ENR dapat bertahan lama dalam jangka waktu lama di dalam tanah, air danau, limbah cair, dan sedimen (Mathai *et al.*, 2023).

Pengaruh peningkatan dari ENR (ENR) di dalam air menyebabkan kekayaan dan keragaman komunitas mikroba menunjukkan penurunan. Pada konsentrasi ENR yang lebih tinggi dengan perpanjangan waktu aksi, kekayaan dan keragaman komunitas bakteri menunjukkan tingkat penurunan termasuk peningkatan jumlah bakteri yang resisten terhadap

antibiotik. Keragaman dan kekayaan komunitas mikroba dalam sedimen lebih tinggi daripada di dalam air. Semakin tinggi konsentrasi ENR yang ditambahkan, semakin besar dampaknya terhadap komunitas dan struktur mikroorganisme di lingkungan perairan, dan akan meningkatkan jumlah bakteri yang tahan obat (Dai *et al.*, 2023). Penggunaan ENR yang berlebihan dalam jangka panjang dapat memperburuk kontaminasi gen resistensi antibiotik (ARGs) dan bakteri resisten antibiotik (ARBs). Jika limbah yang mengandung ENR tidak dikelola dengan baik, hal itu dapat menyebabkan eutrofikasi dan ketidakseimbangan ekosistem air (Zhang *et al.*, 2025). Nilai pH sangat menentukan sifat fisik dan kimia ENR, yang berimplikasi langsung pada efektifitas pengelolaan limbahnya. pH menjadi faktor dalam mendegradasi antibiotik oleh nZVI dan nZVI yang termodifikasi. Pada pH rendah, korosi nZVI meningkat, sedangkan pada pH tinggi, pengendapan  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  menghambat transfer *electron* dari inti Fe ke permukaan terluar, memperlambat efektivitas nZVI (Xue *et al.*, 2024).

Deteksi residu ENR yang ada di lingkungan dapat dilakukan dengan beberapa metode antara lain *microbial inhibition test* (kualitatif atau semikuantitatif), *biosensor*, *Charm II*, *enzyme linked immunosorbant assay* (ELISA), *high performance liquid chromatography* (HPLC) dan *liquid chromatography mass spectrometry* (LC-MS). Deteksi antibiotik enrofloksasin di Portugal secara simultan dengan beberapa jenis antibiotik lain dapat dilakukan menggunakan *ultra high performance liquid chromatography mass spectrometry* (UHPLC-MS/MS) dengan sensitivitas yang tinggi. Validasi metode sudah sesuai dengan aturan regulasi di Eropa sehingga dengan UHPLC-MS/MS dapat terdeteksi residu antibiotik enrofloksasin dengan konsentrasi 0,1-12  $\mu\text{g/kg}$  (Widiyanti *et al.*, 2019)

### 2.3 Nanoscale Zero-Valent Iron (nZVI)

nZVI (*Nanoscale Zero-Valent Iron*) adalah partikel besi skala nano yang memiliki peran penting dalam pembersihan air karena kemampuannya sebagai reduktor dan adsorben. nZVI merupakan spesies aktif ( $\text{Fe}^0$ ) yang dapat mereduksi polutan organik dan dapat mengoksidasi dirinya sendiri untuk membentuk ikatan dengan polutan tersebut. nZVI memiliki gugus hidroksil (-OH) pada permukaannya yang membantu proses adsorpsi. Secara karakteristik, nZVI dibuat melalui metode *bottom-up* yang memiliki struktur unik berupa *core-shell* (inti cangkang) yang terdiri dari besi metalik di bagian intinya dan cangkang oksida valensi campuran yang mengandung Fe(II) dan Fe (III) yang dihasilkan dari proses oksidasi inti. Inti berfungsi sebagai sumber elektron, yang menyediakan daya reduksi untuk reaksi, sementara cangkang berfungsi sebagai Lokasi untuk interaksi elektrostatik dan reaksi kimia kompleks (kemisorpsi). Selain mengurangi berbagai polutan anorganik dan senyawa organik terhalogenasi, nZVI berpotensi digunakan berbagai kontaminan yang lebih luas yang dapat mengalami reduksi, adsorpsi pada presipitasi, permukaan, atau kombinasi dari proses tersebut (Ghaffarzadeh *et al.*, 2024).

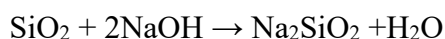
Mekanisme penyisihan polutan oleh nZVI melibatkan proses yang kompleks, terutama melalui adsorpsi, reaksi kimia redoks (khususnya reduksi), dan presipitasi (pengendapan). Dalam pengolahan limbah, inti besi ( $\text{Fe}^0$ ) menyediakan daya reduksi untuk mengubah polutan menjadi bentuk yang kurang berbahaya, sementara lapisan oksidasinya memfasilitasi interaksi elektrostatik dan kemisorpsi polutan pada permukaannya. Sebagai contoh, pada kondisi keasaman rendah, lapisan oksida besi akan bermuatan positif sehingga menarik anion, sedangkan pada keasaman tinggi akan bermuatan negatif yang menarik kation logam untuk diimobilisasi ke permukaan padat nZVI. Terdapat berbagai Teknik untuk memproduksi nZVI yaitu reduksi termal, bahan kimia cair seperti natrium borohidrida dan gas hydrogen, metode elektrokimia, mikroemulsi, metode ultrasonic, sintesis ramah lingkungan, dan penggilingan

(Ghaffarzadeh *et al.*, 2024) Penggunaan nZVI murni seringkali terbatas karena kecenderungannya untuk mengalami agregasi (penggumpalan) dan pembentukan karat (oksida besi) pada permukaannya yang dapat menutup situs aktif (Raza Ul Mustafa *et al.*, 2024). nZVI memiliki kekurangan seperti mudah teroksidasi dan rentan terhadap penggumpalan. Upaya untuk mengatasi kekurangan ini termasuk modifikasi permukaan dengan surfaktan dan penambahan penyangga (Wongso *et al.*, 2024).

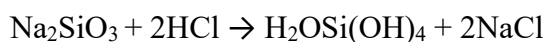
## 2.4 Silika (SiO<sub>2</sub>)

Silika gel merupakan salah satu material berbasis silika yang mempunyai kegunaan pada industri farmasi, keramik, cat, dan aplikasi khusus pada bidang kimia. Silika adalah senyawa kimia yang memiliki rumus molekul SiO<sub>2</sub> (silicon dioxide) yang dapat diperoleh dari silika mineral, nabati dan sintesis kristal. Struktur satuan mineral silika pada dasarnya mengandung kation Si<sup>4+</sup> yang terkoordinasi secara tetrahedral dengan anion O<sup>2-</sup>. Namun demikian, susunan tetrahedral SiO<sub>4</sub> pada silika gel tidak beraturan (Simatupang *et al.*, 2017). Silika memiliki karakteristik struktur berpori yang dimana berhubungan dengan luas permukaan, semakin kecil ukuran pori-pori silika mengakibatkan luas permukaan semakin besar sehingga kemampuan adsorpsi bertambah. Selain itu, silika mempunyai sifat unik yang tidak dimiliki oleh senyawa anorganik lainnya, seperti sifat inert, sifat adsorpsi dan pertukaran ion yang baik, mudah dimodifikasi dengan senyawa kimia tertentu, kestabilan mekanik dan kestabilan termal tinggi, serta dapat digunakan untuk prekonsentrasi atau pemisahan analit karena proses pengikatan analit pada permukaan silika bersifat reversible (Hardyanti *et al.*, 2017). Silika gel merupakan salah satu padatan anorganik yang mempunyai situs aktif gugus silanol (Si-OH) dan siloksan (Si-O-Si) di permukaan serta sifat fisik seperti kestabilan mekanik, porositas dan luas permukaan. Adanya gugus -OH yang mampu membentuk ikatan hidrogen dengan gugus yang sama dari molekul yang lain menyebabkan silika dapat digunakan sebagai pengering dan fase diam pada kolom kromatografi atau adsorben untuk senyawa organik (Sudiarta *et al.*, 2013).

Silika gel termasuk polimer asam silikat dengan berat molekul besar dan banyak menyerap air sehingga berbentuk padat kenyal. Silika gel adalah silika amorf yang terdiri atas globula-globula SiO<sub>4</sub> tetrahedral yang tidak teratur dan beragregat membentuk kerangka tiga dimensi. Walaupun namanya, gel silika padat. Silika gel merupakan suatu bentuk dari silika yang dihasilkan melalui penggumpalan sol natrium silikat (NaSiO<sub>2</sub>). Sol mirip agar-agar ini dapat didehidrasi sehingga bentuknya berubah menjadi padatan atau butiran mirip kaca yang bersifat tidak elastis. Karakteristik tersebut membuat silika gel dapat dimanfaatkan sebagai zat penyerap, pengering, dan pendorong katalis. Garam-garam kobalt dapat diadsorpsi oleh gel ini. Silika dapat diekstrak dengan menggunakan pelarut alkali yaitu NaOH, karena silika memiliki kelarutan yang rendah pada pH 2-9 yaitu 100-900 gram/L dan kelarutan yang lebih tinggi di atas pH 9. Sehingga memungkinkan untuk memperoleh silika yang optimal jika pelarutnya alkali dan ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Scot (1993), dengan reaksinya



Larutan Natrium Silikat mempunyai pH 11-12, sehingga dengan adanya penambahan HCl akan membentuk monomer-monomer asam silikat yang memungkinkan terbentuknya gel, berikut adalah reaksinya:



Penambahan HCl pada larutan Natrium Silikat dilakukan sampai larutan netral (Meriatna *et al.*, 2015).

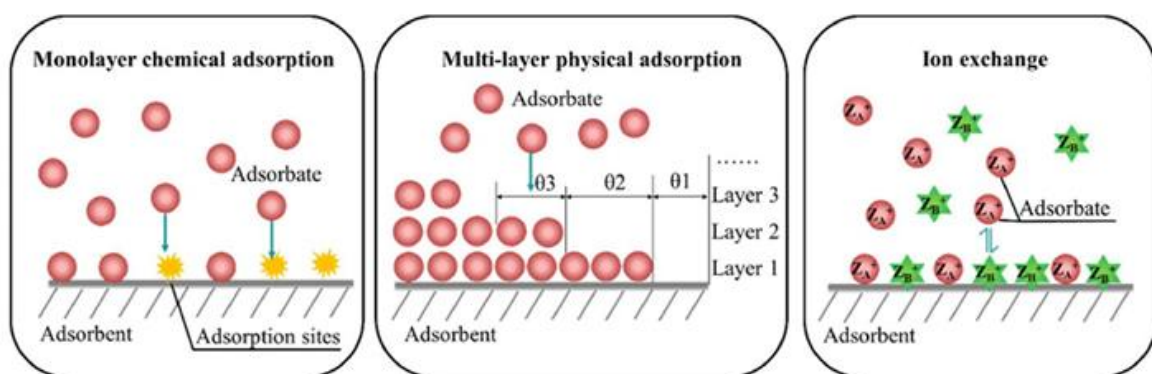
Salah satu sumber silika yang dapat ditemukan dan banyak jumlahnya yaitu berasal dari limbah industri. Limbah industri menjadi salah satu masalah lingkungan yang cukup serius. Pemanfaatan limbah industri menjadi solusi untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dari aktivitas industri. Industri galangan kapal memiliki limbah yang menghasilkan limbah pasir silika yang cukup besar dan sering kali dibuang tanpa pemanfaatan lebih lanjut. Pasir silika digunakan pada proses *sandblasting* untuk membersihkan permukaan kapal dari kotoran dan kontaminan lainnya. Salah satu pemanfaatan limbah pasir silika yaitu dapat digunakan sebagai adsorben. penggunaan adsorben silika yang bersumber dari limbah *sandblasting* dapat menjadi alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan bahan kimia sintesis lainnya (Himaya *et al.*, 2025).

## 2.5 Adsorpsi

Adsorpsi Adalah terserapnya suatu zat (molekul atau ion) pada permukaan adsorben. Suatu molekul dapat teradsorpsi apabila gaya adhesi antara molekul adsorbat dengan molekul adsorben lebih besar dibandingkan dengan gaya kohesi pada masing-masing molekul. Proses adsorpsi dipengaruhi oleh luas permukaan adsorben, semakin besar luas permukaan adsorben maka akan semakin banyak molekul yang dapat terikat atau diserap (Wijayanti & Kurniawati, 2019). Setiap permukaan adsorben memiliki sifat yang berbeda tergantung pada susunan molekul-molekul zat. Setiap molekul dikelilingi oleh molekul-molekul lainnya, sehingga gaya tarik menarik antar molekul akan sama besar, setimbang ke segala bagian (Ibnu Hajar *et al.*, 2018)

### 2.5.1 Mekanisme Adsorpsi

Mekanisme adsorpsi meliputi adsorpsi kimia yaitu dengan pembentukan bahan kimia ikatan, adsorpsi fisik yang terkait dengan gaya van der Waals dan pertukaran ion. Skema proses adsorpsi terdapat pada gambar 2.1 Pada model adsorpsi kimia mempertimbangkan proses adsorpsi lapisan Tunggal dimana molekul adsorbat teradsorpsi pada adsorben. Model adsorpsi fisik secara teoritis mensimulasikan proses adsorpsi multi-lapisan. Gaya van der Waals Adalah gaya penggerak utama adsorpsi fisik.



**Gambar 2. 2 Mekanisme Adsorpsi yang Mungkin Terjadi**

Sumber: (Wang & Guo, 2020)

### 2.5.2 Jenis Adsorpsi, Faktor Adsorpsi, dan Aktivitas

Mekanisme penyerapan pada adsorpsi dibedakan menjadi dua yaitu serapan secara fisik dan serapan secara kimia. Adsorpsi fisika Adalah proses interaksi antara adsorben dengan adsorbat yang melibatkan gaya antar molekul seperti gaya van der Waals. Adsorpsi fisik tidak spesifik karena atom atau molekul yang mengalami adsorpsi fisik tidak terikat secara kimia pada atom permukaan tetapi menempati bergantung pada ukuran atom, molekul atau ion yang menguap, dan panas adsorpsi fisik rendah. Panas adsorpsinya relatif rendah yaitu dibawah 20 kCal/mol. Jenis adsorpsi ini juga melibatkan banyak lapisan pada permukaan. Sedangkan adsorpsi kimia terjadi ketika interaksi adsorben dan adsorbat melibatkan pembentukan ikatan kimia. Proses adsorpsi melibatkan berbagai macam gaya yakni gaya *van der Waals*, gaya elektrostatik, ikatan hidrogen serta ikatan kovalen (Anggriawan *et al.*, 2019). Adsorpsi kimia ditandai dengan sifat spesifik, karena terjadi dalam kondisi tertentu dan adsorpsi mungkin tidak terjadi pada permukaan lain dalam kondisi yang sama atau pada permukaan itu sendiri ketika kondisi lingkungan berubah. Adsorpsi kimia menghasilkan panas yang lebih tinggi daripada yang dihasilkan oleh adsorpsi fisik, yang dapat mencapai tingkat panas yang dihasilkan ketika ikatan kimia normal terbentuk (Mhemeed, 2018). Karena adanya ikatan kimia yang terputus dan terbentuk selama proses, maka besarnya panas adsorpsi mempunyai nilai yang hampir sama dengan panas reaksi kimia, yaitu sekitar 20 –100 kCal/mol. Adsorpsi kimia membutuhkan tempat yang spesifik dan molekul hanya teradsorpsi pada tempat tersebut (Yustinah *et al.*, 2019)

Proses adsorpsi oleh suatu adsorben dipengaruhi beberapa faktor serta mempunyai pola isotherm adsorpsi tertentu yang khas. Hal yang mempengaruhi yaitu seperti jenis adsorben, jenis zat yang diserap, luas permukaan adsorben, konsentrasi zat yang diadsorpsi, dan suhu yang mempengaruhi dalam proses adsorpsi. Dengan adanya faktor tersebut, setiap adsorben yang menyerap zat satu dengan zat lain tidak akan mempunyai pola adsorpsi yang sama (Wijayanti & Kurniawati, 2019)

Faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi proses adsorpsi adalah sebagai berikut:

#### A. Pengaruh pH

Muatan permukaan adsorben dan derajat ionisasi molekul adsorbat dipengaruhi oleh pH larutan yang sangat penting dalam proses adsorpsi. Permukaan adsorben bermuatan positif pada nilai pH asam, sehingga lebih cocok untuk ion bermuatan negatif, dan karena permukaan bermuatan negatif pada pH tinggi, maka lebih cocok untuk ion bermuatan positif. pH optimum ditentukan oleh muatan permukaan adsorben dan derajat ionisasi molekul adsorbat. Adsorpsi meningkat selama ionisasi molekul yang teradsorpsi dicegah, dan adsorpsi mencapai maksimum ketika molekul tidak sepenuhnya terionisasi (Fakioğlu & Kalpaklı, 2022).

#### B. Pengaruh waktu reaksi (waktu kesetimbangan adsorpsi)

Pada awal proses adsorpsi tingkat adsorpsi lebih tinggi karena struktur pori yang kosong. Adsorben dan nilainya menurun akibat bertambahnya jumlah molekul yang menempel pada permukaan seiring berjalannya waktu (Fakioğlu & Kalpaklı, 2022)

#### C. Pengaruh suhu lingkungan

Suhu lingkungan dapat mempengaruhi laju adsorpsi. Ketergantungan adsorpsi pada suhu bersifat endotermik atau eksotermik. Suhu memiliki dampak signifikan pada selektivitas dan kapasitas adsorpsi. Kelarutan dipengaruhi oleh konsentrasi zat terlarut dan suhu sistem. Kelarutan zat terlarut dapat ditingkatkan dengan menaikkan suhu lingkungan (Fakioğlu & Kalpaklı, 2022)

#### D. Adsorben dan konsentrasi adsorbat

Ukuran ion pada adsorbat berperan penting dalam proses adsorpsi yang dapat mempengaruhi jumlah adsorpsi ion tertentu pada permukaan atom dengan adanya lebih dari satu ion dengan ukuran yang berbeda di dalam larutan. Kelarutan adsorben dalam pelarut juga berpengaruh pada

proses adsorpsi di mana jumlah adsorben berkurang dengan meningkatnya kelarutannya dalam pelarut (Mhemeed, 2018).

#### E. Proses pengadukan

Laju adsorpsi tidak hanya dipengaruhi oleh *film diffusion* dan *pore diffusion*, tetapi juga dipengaruhi oleh proses pengadukan. Apabila pengadukan berlangsung dengan kecepatan rendah, adsorben akan sulit untuk menembus lapisan *film* antara permukaan adsorben dan *film diffusion* yang merupakan faktor pembatas yang memperkecil kecepatan penyerapan. Jika pengadukan sesuai dan tepat maka akan menaikkan *film diffusion* sampai titik *pore diffusion* yang merupakan faktor pembatas dalam sistem *batch* dilakukan pengadukan yang tinggi (Ibnu Hajar *et al.*, 2018).

### 2.5.3 Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi adalah model adsorpsi yang menggambarkan bagaimana mekanisme proses adsorpsi yang terjadi berdasarkan asumsi terkait dengan kimisorpsi/fisiosorpsi. Studi kinetika adsorpsi selalu menggunakan dua model kinetic, yaitu model orde pertama semu dan model orde kedua semu untuk menyesuaikan data percobaan dengan nilai prediksi model yang dinyatakan dalam koefisien korelasi ( $R^2$ ) (Hardianti & Octaviannus, 2021). Kinetika adsorpsi dipengaruhi oleh banyak parameter seperti luas permukaan dan ukuran pori adsorben nano, konsentrasi ion logam (adsorbat) yang digunakan dan parameter adsorpsi seperti suhu adsorpsi, pH, dan laju pencampuran (Kagalkar *et al.*, 2025).

Analisa kinetika adsorpsi didasarkan pada kinetika orde nol, orde satu dan orde dua yaitu sebagai berikut:

#### a) Pseudo-First Order

Kinetika pseudo-first order merupakan orde satu parsial terhadap konsentrasi gugus fungsi adsorben yang bebas dan orde nol parsial terhadap jumlah adsorbat yang ada pada larutan. Model kinetika ini didasarkan pada persamaan laju reaksi Lagergren. Persamaan tersebut hanya mampu menjelaskan tahap awal proses adsorpsi dan tidak seluruh waktu kontak. Meskipun memiliki dasar teoritis yang kuat, validitasnya bergantung pada interaksi permukaan yang benar-benar menjadi tahap pembatas laju. Persamaan kinetika tersebut dirumuskan sebagai berikut:

$$\ln (Q_e - Q_t) = \ln(Q_e) - k_1 t \quad (2.1)$$

Dimana :

$k_1$  = konstanta laju orde satu semu ( $\text{menit}^{-1}$ )

$Q_t$  = kapasitas adsorpsi pada Time  $t$  (mg/g)

$Q_e$  = kapasitas adsorpsi saat kesetimbangan (mg/g)

#### b) Pseudo-Second Order

Kinetika pseudo-second order merupakan Langkah pengontrol laju. Model kinetik ini berlangsung melalui mekanisme reaksi orde kedua, yang menyiratkan bahwa transfer atau pembagian elektron antara adsorben dan adsorbat merupakan fase pembatas laju. Model matematika mengasumsikan proses adsorpsi homogen Dimana semua Lokasi pada adsorben dapat diakses untuk molekul adsorbat. Persamaan dari model matematika pseudo-second order adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{d_q}{d_t} &= k_2 (q_e - q_t)^2 \\ \frac{1}{q_t} &= \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Model ini mengasumsikan bahwa kapasitas adsorpsi berbanding lurus dengan jumlah situs aktif pada adsorben. Interpretasi literal dari model ini mengimplikasikan adanya tumbukan antara dua situs yang tidak terisi di permukaan adsorben selama tahap pembatas laju, meskipun konsep ini seringkali dianggap tidak realistis untuk substrat padat. Banyak penelitian menemukan bahwa model pseudo-orde kedua memberikan kecocokan data yang lebih baik dibandingkan pseudo orde pertama (Hubbe *et al.*, 2019)

### 2.5.3 Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi adalah pengukuran jumlah adsorbat yang terikat pada adsorben sebagai fungsi dari konsentrasi kesetimbangan pada suhu konstan tertentu yang menghasilkan suatu isotherm adsorpsi. Isoterm adsorpsi digunakan sebagai gambaran dan mengevaluasi karakteristik adsorben terhadap berbagai jenis adsorbat. Berbagai model matematis telah dikembangkan untuk menjelaskan terjadinya adsorpsi tersebut (Fathaddin, 2021). Isotherm memiliki peran penting dalam menentukan mekanisme adsorpsi. Permukaan dapat dianggap sebagai lapisan tunggal atau multi-lapisan. Isoterm Langmuir, Freundlich, Temkin, dan Brunauer-Emmet-Teller (BET) adalah model isotherm yang paling banyak digunakan secara ekstensif untuk menghilangkan kontaminan dari larutan berair (Nayak *et al.*, 2023).

#### A. Isoterm Langmuir

Adsorpsi Langmuir dikembangkan untuk menggambarkan proses adsorpsi pada fase gas-padat yang digunakan sebagai dasar dalam menentukan dan membandingkan kapasitas adsorpsi dari berbagai adsorben. Isoterm Langmuir memperhitungkan cakupan permukaan dengan menyeimbangkan laju adsorpsi relative dan desorpsi (kesetimbangan dinamis). Adsorpsi berbanding lurus dengan fraksi permukaan adsorben yang terbuka sedangkan desorpsi sebanding dengan fraksi dari permukaan adsorben yang tertutup. Persamaan isotherm Langmuir dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L C_e} + \frac{1}{q_{max}} \quad (2.3)$$

Dimana  $C_e$  adalah konsentrasi adsorbat pada kesetimbangan.  $K_L$  adalah konstanta Langmuir yang berkaitan dengan kapasitas adsorpsi ( $\text{mg g}^{-1}$ ),  $q_m$  adalah kapasitas adsorpsi ( $\text{mg g}^{-1}$ ) yang dapat dikorelasikan dengan variasi luas permukaan dan porositas adsorben yang sesuai, yang berarti bahwa luas permukaan dan volume pori yang besar akan menghasilkan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi.

Karakteristik penting dari isotherm Langmuir dinyatakan dengan konstanta tak berdimensi yang dimaksud faktor pemisahan.  $R_L$

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_o} \quad (2.4)$$

Dimana  $K_L$  Adalah konstanta Langmuir ( $\text{L/mg}$ ) dan  $C_o$  Adalah awal konsentrasi adsorbat ( $\text{mg/L}$ ).

Nilai  $R_L$  menunjukkan bahwa adsorpsi tidak menguntungkan ketika  $R_L > 1$ , linier ketika  $R_L = 1$ , menguntungkan apabila  $0 < R_L < 1$ , dan irreversible ketika  $R_L = 0$ . (Ayawei *et al.*, 2017).

## B. Isoterm Freundlich

Isoterm Freundlich dapat diterapkan terhadap proses adsorpsi yang terjadi pada permukaan heterogen. Isoterm ini mendefinisikan heterogenitas permukaan dan distribusi eksponensial situs aktif dan energinya. Model Freundlich dianggap sebagai persamaan empiris tanpa makna fisik. Isoterm Freundlich diterapkan untuk mewakili adsorpsi multi-lapisan pada permukaan heterogen (Wang & Guo, 2020). Bentuk linear dari isoterm Freundlich adalah sebagai berikut:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.5)$$

Dimana  $q_e$  adalah kapasitas adsorpsi pada kesetimbangan ( $\text{mg.g}^{-1}$ ),  $K_F$  adalah konstanta Freundlich yang memperkirakan kapasitas adsorpsi ( $\text{L/mg}$ ),  $n$  menunjukkan derajat nonlinieritas ( $\text{g L}^{-1}$ ) perlu dicatat bahwa  $n$  menunjukkan derajat nonlinieritas dan kekuatan adsorpsi dalam model Freundlich, yang mencirikan kemisorpsi ( $n < 1$ ), fisisorpsi ( $n > 1$ ), atau adsorpsi linier ( $n = 1$ ) yang mewakili partisi independent konsentrasi antara dua fase, dengan  $\frac{1}{n}$  lebih lanjut menggambarkan adsorpsi normal ( $1/n < 1$ ), adsorpsi kooperatif ( $1/n > 1$ ), dan adsorpsi pada permukaan heterogen ( $0 < 1/n < 1$ ) dengan nilai  $n$  yang mendekati nol menunjukkan permukaan adsorben yang heterogen (Hastuti *et al.*, 2026).

## C. Isoterm Temkin

Model isoterm Temkin memperhitungkan efek interaksi adsorbat tidak langsung pada proses adsorpsi. Diasumsikan untuk panas adsorpsi ( $\Delta H_{\text{ads}}$ ) dari semua molekul dalam lapisan menurun secara linier sebagai akibat dari peningkatan cakupan permukaan. Isoterm Temkin hanya berlaku untuk suatu perantara rentang konsentrasi ion. Bentuk linier Temkin mode isoterm Adalah sebagai berikut:

$$q_e = \frac{Rt}{b} \ln K_T + \frac{RT}{b} \ln C_e \quad (2.6)$$

Dimana  $b$  Adalah konstanta Temkin yang berhubungan dengan panas adsorpsi ( $\text{Jmol}^{-1}$ ) dan  $K_T$  adalah konstanta isoterm Temkin ( $\text{Lg}^{-1}$ ) (Ayawei *et al.*, 2017).

## D. Isoterm BET

Metode BET digunakan untuk mempresentasikan adsorpsi gas pada lapisan multimolekul. Model ini diterapkan untuk menghitung luas permukaan spesifik dan distribusi ukuran pori material berpori. Asumsi dasar isoterm BET adalah bahwa adsorpsi merupakan adsorpsi homogen multi-lapisan, energi adsorpsi pada lapisan pertama berbeda dengan lapisan lainnya, dan untuk lapisan laju adsorpsi sama dengan laju desorpsi. Metode BET dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$q_e = \frac{q_{mBET} K_{BET1} C_e}{(1 - K_{BET2} C_e)[1 - K_{BET2} C_e + K_{BET1} C_e]} \quad (2.7)$$

Dimana  $K_{BET1}$  ( $\text{L.mg}^{-1}$ ) dan  $K_{BET2}$  ( $\text{L.mg}^{-1}$ ) Adalah parameter kesetimbangan adsorpsi,  $q_{mBET}$  ( $\text{mg.g}^{-1}$ ) Adalah jumlah adsorpsi monolayer maksimum. Untuk  $n=1$ , isoterm BET direduksi menjadi isoterm Langmuir. Untuk  $n = \infty$ , menggunakan persamaan diatas (Wang & Guo, 2020).

## 2.6 Uji Karakterisasi

### 2.6.1 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan pengembangan dari teknik mikroskopi elektron yang mampu mengamati morfologi sampel dengan resolusi tinggi hingga 200 - 1.000.000 kali pembesaran, bergantung pada instrumen dan kondisi pengujian. SEM sering juga digunakan untuk melihat struktur permukaan sampel berdasarkan karakteristik sampel yang akan dihasilkan dari pancaran atom sampel pada iradiasi dengan berkas elektron yang difokuskan dari SEM (Mohammed & Abdullah, 2018).

### 2.6.2 Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX)

Uji EDX adalah metode pengujian yang digunakan untuk menentukan unsur-unsur kimia yang terkandung dalam suatu specimen atau material. Uji EDX bertujuan untuk menganalisis komposisi mikro suatu material guna mengetahui pengaruh unsur-unsur penyusunnya terhadap kekuatan material yang dihasilkan, khususnya terkait dengan jumlah kandungan gas (seperti O<sub>2</sub> dan N) sangat mempengaruhi kekuatan material. Semakin sedikit kandungan unsur gas, maka kepadatan udara akan semakin baik dan jumlah void (ruang kosong) pada material akan berkurang. Prinsip dasar dari analisis EDX adalah melacak dan mengukur sifat-sifat sinar-X yang dibangkitkan oleh electron-elektron cepat. Prosesnya adalah sebagai berikut:

- a. Sebuah piston electron memproduksi sinar electron yang kemudian dipercepat oleh anoda
- b. Lensa *magnetic* memfokuskan sinar *electron* tersebut menuju ke sampel
- c. Sinar elektron yang berfokus memindai keseluruhan permukaan sampel
- d. Saat elektron mengenai sampel, sampel akan mengeluarkan elektron baru atau sinyal yang dapat diterima oleh *detector* dan hasilnya dikirim ke monitor untuk dianalisis

Hasil dari pengujian EDX biasanya disajikan dalam bentuk tabel data konsentrasi dan grafik spektrum. Grafik spektrum dengan puncak tertentu dapat mengonfirmasi kondisi fisik, seperti adanya pori yang besar pada permukaan serat karbon (Nindra *et al.*, 2023)

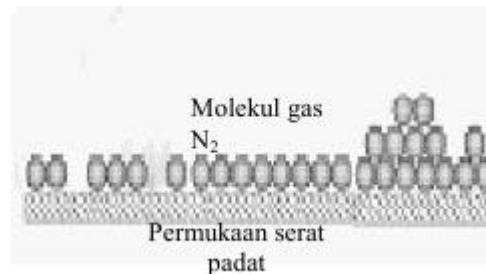
### 2.6.3 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

FTIR (*fourier transform infrared*) merupakan cara untuk mendapatkan spektrum inframerah dari penyerapan emisi zat gas, padat, ataupun zat cair. Cara kerja dari alat FTIR yaitu untuk mengetahui suatu senyawa atau gugus fungsi dari objek yang sedang dianalisis. FTIR lebih banyak dipakai dalam menentukan senyawa organik secara kualitatif ataupun juga secara kuantitatif. Penggunaannya secara kualitatif digunakan untuk mendeteksi dan menentukan gugus fungsional yang terdapat dalam suatu senyawa. Sedangkan pemanfaatannya secara kuantitatif digunakan untuk mengidentifikasi konsentrasi analit pada suatu sampel. Pengolahan data ini memberikan suatu informasi mengenai hal-hal kimia, seperti penataan atom/gugus yang terikat pada polimer maupun polipaduan, kemudian perubahan tekanan reaksi kimia disebabkan adanya proses induksi yang terjadi.

Cara pengujiannya dilakukan dengan menggunakan cara memantulkan Cahaya atau sinar infrared yang melewati tempat kristal dalam spektrofotometer sehingga terjadi kontak pada permukaannya, terjadi proses perubahan atau peruraian senyawa kimia atau terjadinya induksi karena oksidasi dengan panas ataupun Cahaya yang dapat berlangsung secara cepat dengan *infrared* (Hartanto *et al.*, 2023).

#### 2.6.4 Analisis BET

*Brunauer Emmet-Teller* (BET) adalah Teknik karakterisasi yang digunakan untuk menentukan luas permukaan spesifik (SSA), volume pori, dan distribusi ukuran pori suatu material melalui adsorpsi gas (biasanya nitrogen,  $N_2$ ). Cara kerja BET yaitu penyerapan gas Nitrogen oleh permukaan serat pada kondisi isothermal dan vakum. Cara kerja diilustrasikan seperti gambar berikut:



**Gambar 2. 3 Penyerapan Molekul Gas Nitrogen oleh Permukaan Serat Padat**  
**Sumber: (Marsyahyo,2009)**

#### 2.6.5 Zeta Potensial

Zeta potensial merupakan karakteristik yang ada pada material, yaitu digunakan untuk memprediksi stabilitas larutan koloid. Dimana ada interaksi antar partikel penting dalam stabilitas larutan koloid. Zeta potensial adalah nilai yang mengindikasikan kekuatan tolak menolak antar partikel dan biasanya digunakan untuk mengkarakterisasi sifat muatan permukaan partikel nano. Zeta potensial mencerminkan potensi listrik partikel dan dipengaruhi oleh komposisi partikel dan media dimana media tersebut terdispersi. Zeta potensial juga dapat digunakan untuk menentukan apakah bahan aktif yang terisi dienkapsulasi di dalam pusat nanocapsule atau teradsorpsi ke dalam permukaan (Dyah Pertiwi *et al.*, 2017).

#### 2.7 Limbah Sandblasting

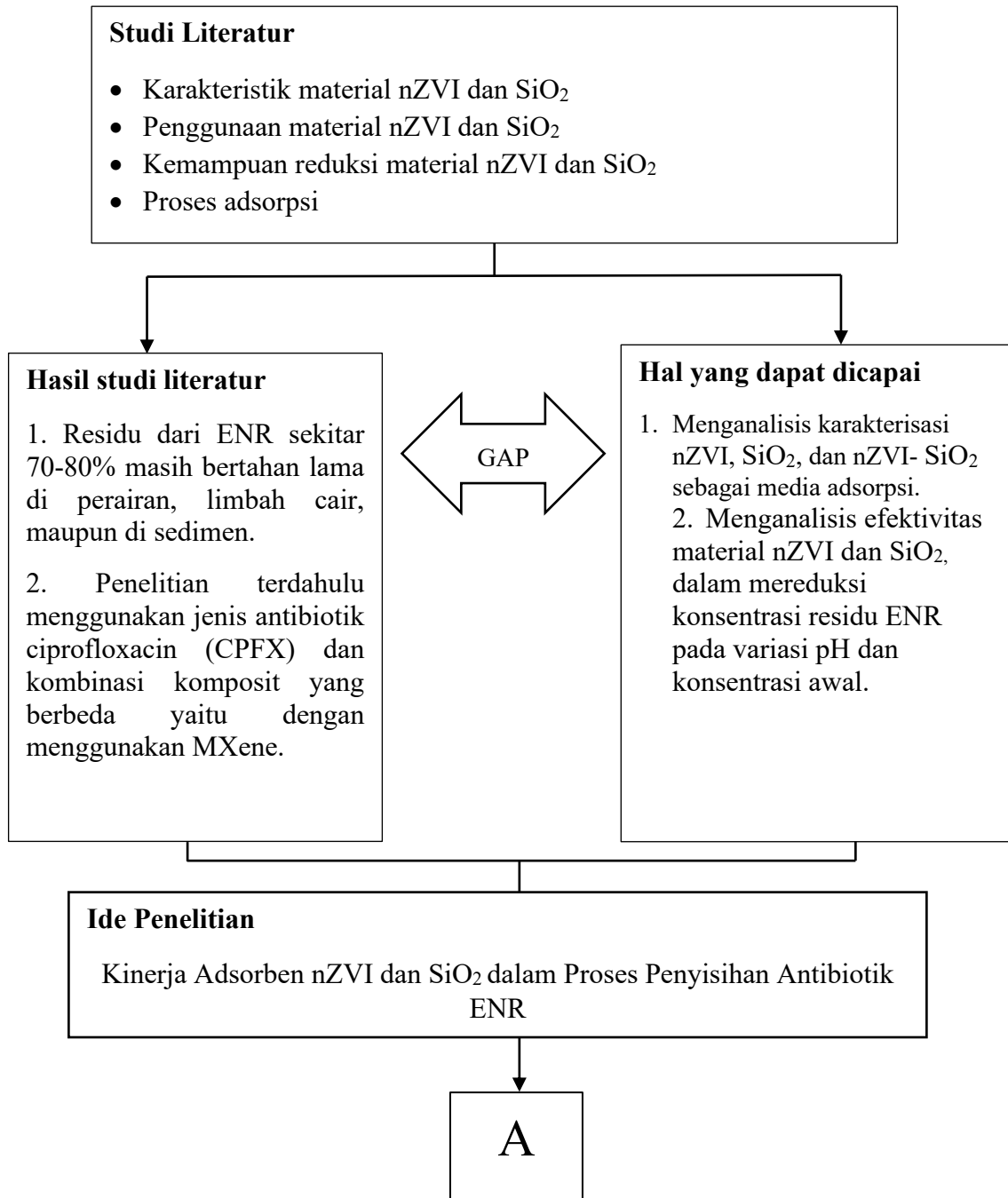
Sandblasting adalah salah satu metode pembersihan badan kapal saat preparasi maupun Pembangunan bangunan kapal baru pada suatu galangan. Sandblasting biasa juga disebut sebagai abrasive blast cleaning Sandblasting bertujuan untuk mengikis kotoran berupa karat akibat oksidasi antara air laut dan udara, selain itu sandblast juga dapat membersihkan kotoran berupa mill scale (pelat baru) (Hendrawan & Aprilian, 2020). Pasir sandbasting merupakan pasir silika hasil dari proses blasting. Proses blasting digunakan untuk perawatan dan pembersihan peralatan yang terbuat dari logam. Proses sandblasting menghasilkan pasir silika yang sudah bercampur dengan beragam impurities yang kemudian dikategorikan sebagai limbah B3 (Bahan Beracun dan Berbahaya). Kandungan logam berat dan jumlah limbah sandblasting yang besar akan mencemari lingkungan dan mengganggu kesehatan manusia jika tidak dikelola dengan baik (Layang *et al.*, 2025).

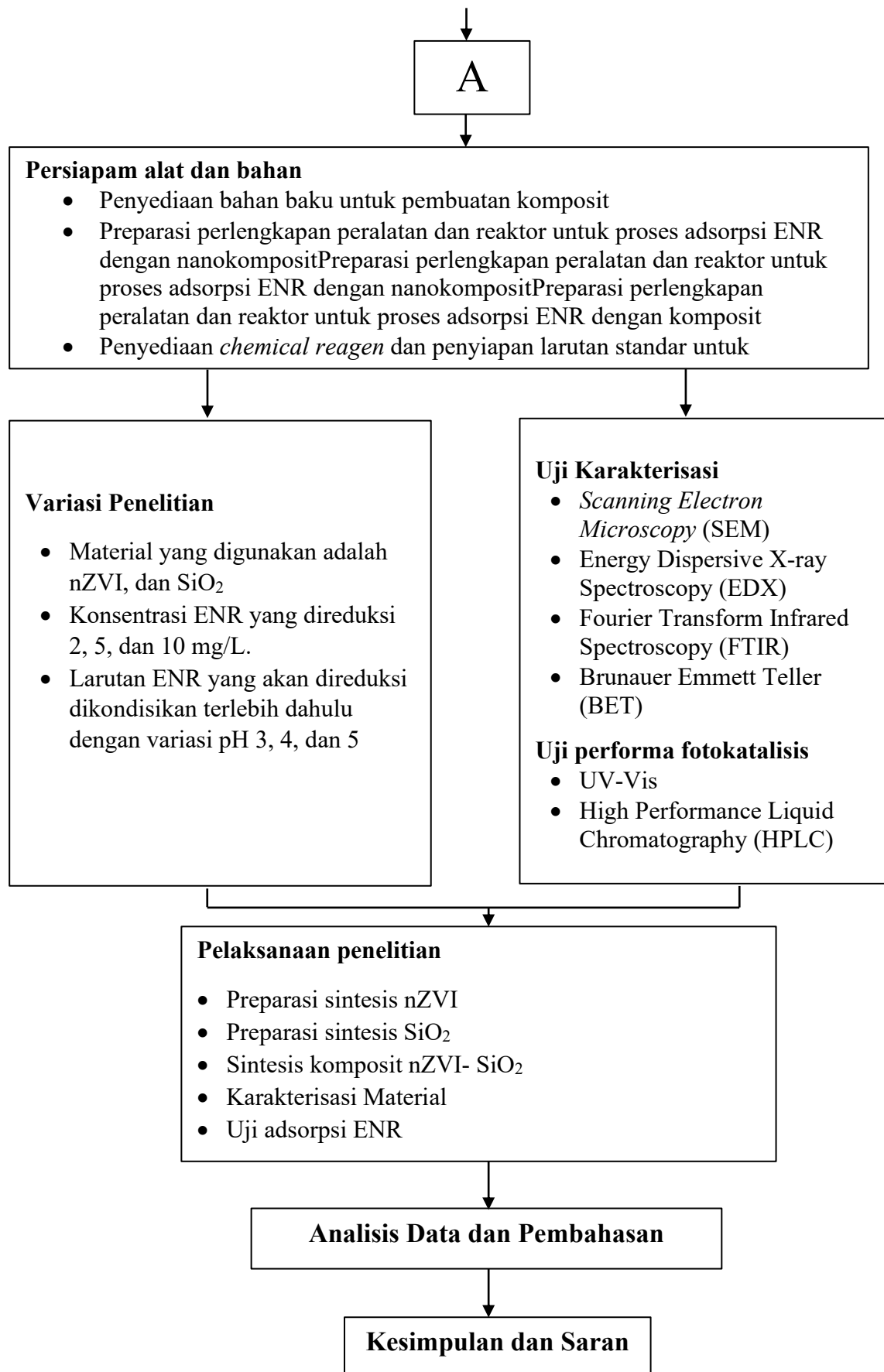
## BAB 3

### METODOLOGI

#### 3.1 Kerangka Penelitian

Dalam melakukan penelitian diperlukan adanya kerangka penelitian agar tahapan aktivitas peneliti yang disusun sistematis dan menghasilkan kesimpulan yang menjawab tujuan, kerangka penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.1





### Gambar 3.1 Kerangka Penelitian

#### 3.1.1 Ide Penelitian

Ide penelitian ini yaitu tentang penggunaan adsorben komposit nZVI-SiO<sub>2</sub> dalam proses penyisihan antibiotik ENR. Hal ini muncul karena memiliki urgensi yang tinggi mengingat peningkatan penggunaan antibiotik di sektor peternakan dan kesehatan yang berpotensi mencemari lingkungan, khususnya di perairan. Dari masalah yang ada kemudian diidentifikasi batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini sehingga rumusan masalah dapat disusun untuk menemukan solusi terhadap masalah-masalah yang dipilih dan ditemukan penyelesaian masalah melalui analisis dari data-data yang dikumpulkan.

#### 3.1.2 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mendukung teori dalam penelitian yang lebih mendalam terkait kemampuan adsorben komposit nZVI-SiO<sub>2</sub> dalam proses penyisihan antibiotik ENR. Studi literatur yang digunakan berupa jurnal, buku, serta hasil penelitian lainnya yang berkaitan dengan proses adsorpsi, pembuatan sintesis nZVI dan SiO<sub>2</sub> serta karakteristiknya.

#### 3.1.3 Variabel dan Parameter Penelitian

Pada penelitian ini digunakan 3 jenis variabel, yakni variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol. Penggunaan variabel dalam penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi berbagai unsur atau faktor yang berperan dalam terjadinya variasi dan perubahan dalam penelitian. Variabel bebas adalah variabel yang divariasikan untuk mengetahui hubungan sebab-akibat. Variabel terikat adalah variabel yang berhubungan langsung dengan variabel bebas atau tidak. Sedangkan, variabel kontrol adalah variabel yang tetap konstan, sehingga pengaruh variabel bebas dapat dianalisis. Berikut merupakan variabel yang digunakan pada penelitian ini:

##### a. Variabel Bebas

Variabel bebas pada penelitian ini adalah:

- Komposit yang digunakan adalah nZVI, SiO<sub>2</sub>, dan campuran dari nZVI- SiO<sub>2</sub>.
- Konsentrasi ENR yang direduksi adalah 2, 5, dan 10 mg/L.
- Larutan ENR yang akan direduksi dikondisikan terlebih dahulu dengan variasi pH 3, 4, dan 5.

##### b. Variabel Terikat

Variabel terikat pada penelitian ini adalah konsentrasi akhir dan kapasitas adsorpsi

##### c. Variabel Kontrol

Variabel kontrol pada penelitian ini yaitu kecepatan pengadukan, dan suhu saat proses adsorpsi.

### 3.2 Bahan dan peralatan yang digunakan

#### 3.2.1 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

- |   |                     |   |                              |
|---|---------------------|---|------------------------------|
| a | Beaker glass        | m | Syringe filter 25 mm 0,22 µm |
| b | Gelas ukur          | n | Alu dan mortar               |
| c | Erlenmeyer          | o | Buret                        |
| d | Centrifuge          | p | Botol sampel                 |
| e | Centrifuge tube     | q | Aluminium foil               |
| f | Spatula besi & kaca | r | Plastik clip                 |

|   |                  |   |          |
|---|------------------|---|----------|
| g | Magnetic stirrer | s | Pinset   |
| h | Magnet bar       | t | parafilm |
| i | Neraca digital   | u | Sput     |
| j | Pipet tetes      |   |          |
| k | Botol vial       |   |          |
| l | Syringe          |   |          |

### 3.2.2 Bahan Penelitian

Adapun bahan yang akan digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

|   |                                          |   |                     |
|---|------------------------------------------|---|---------------------|
| a | Air ultrapure                            | h | FeCl <sub>3</sub>   |
| b | FeSO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O    | i | Aquabidest          |
| c | Asam klorida (HCL)                       | J | EENR                |
| d | NH <sub>4</sub> OH                       | k | NaOH                |
| e | Natrium Borohidrida (NaBH <sub>4</sub> ) | l | Limbah sandblasting |
| f | Etanol anhidrat                          |   |                     |
| g | Cethyl Methyl Ammonium Bromide (CTAB)    |   |                     |

### 3.3 Pelaksanaan penelitian

Dalam melaksanakan penelitian ini, tahapan-tahapan kerja yang akan dilakukan selama penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

#### 3.3.1 Sintesis dan Uji Material

##### 1. Pembuatan Sintesis Material nZVI

Proses sintesis material nZVI diawali dengan pembuatan Senyawa FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O 0,1 M ditimbang sebanyak 4,1703 g. Kemudian dilarutkan ke dalam 150 mL aquabidest dengan suhu berkisar 20-30°C dalam *beaker glass*. 3 g CTAB (C<sub>19</sub>H<sub>42</sub>BrN) ditambah kedalam aquabidest sebanyak 100 mL. Kedua larutan tersebut dicampurkan lalu dilakukan pengadukan menggunakan magnetic stirrer, setelah itu ditutup dengan parafilm. Dalam beaker lain dibuat larutan NaBH<sub>4</sub> 0,5 M sebanyak 1,892 g NaBH<sub>4</sub> dilarutkan ke dalam 100 ml aquabidest kemudian ditambahkan NH<sub>4</sub>OH 25% sebanyak 5 ml dan ditutup dengan parafilm. Untuk mereduksi Fe<sup>2+</sup> menjadi Fe<sup>0</sup> dilakukan dengan menyiapkan buret yang berisi larutan NaBH<sub>4</sub> dengan kecepatan 10 mL/menit kedalam larutan FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O dan dilakukan pengadukan dengan magnetic stirrer dengan dialiri gas nitrogen untuk meminimalisir terjadinya oksidasi. Selanjutnya larutan dimasukkan ke dalam tabung centrifuge, lalu dilakukan sentrifugasi dengan kecepatan 3000 rpm selama 5 menit. Larutan akan terpisah dengan serbuk besi, kemudian larutan sebagai supernatan tersebut dibuang. Dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali menggunakan etanol hingga terbentuk nZVI. (Wardiyati *et al.*, 2013).

##### 2. Pembuatan Sintesis Material SiO<sub>2</sub>

Nanosilika disintesis dari limbah Sandblasting menggunakan metode alkali fusi. Sandblasting dihaluskan dengan ball mill, kemudian diayak dengan ayakan 200 mesh. Selanjutnya, pasir yang sudah halus dicampur dengan NaOH (rasio 1:1,33) gram ditambahkan sedikit akuades. Campuran difusi dalam furnace pada suhu 500°C selama 4 jam, kemudian

sampel dilarutkan ke dalam akuades. Sampel difilter dengan kertas saring, lalu dipresipitasi menggunakan HCl 2 M hingga terbentuk endapan gel berwarna putih. Selanjutnya gel dicuci dengan akuades, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 40°C selama 12 jam atau dikeringkan pada suhu ruang hingga kering, lalu dikalsinasi dengan furnace pada suhu 500°C selama 4 jam (Waziz *et al.*, 2024)

### 3. Sintesis Komposit nZVI-SiO<sub>2</sub>

Sintesis komposit nZVI-SiO<sub>2</sub> dilakukan dengan metode impregnasi koloid *in-situ*. Keuntungan *in-situ* bertujuan agar nZVI dapat tersebar lebih baik pada permukaan silika yang terbukti meningkatkan efisiensi penyisihan kontaminan. Untuk sintesis *in-situ*, SiO<sub>2</sub> dicampur dengan FeCl<sub>3</sub> dalam pelarut etanol/air (1:1) selama 7 jam dengan pengadukan kuat. Kemudian, ditambahkan larutan NaBH<sub>4</sub> (0,25 M, 50 mL) dengan laju pompa 10 mL/menit. Campuran diaduk selama 30 detik setelah penambahan NaBH<sub>4</sub> selesai. nZVI-SiO<sub>2</sub> yang terbentuk dalam campuran dipisahkan menggunakan magnet dan kemudian segera diaplikasikan untuk menguji efisiensi (Archariyapanyakul *et al.*, 2017).

### 4. Uji pH-pzc

Uji pH-pzc merupakan nilai pH larutan yang memiliki muatan permukaan adsorben sama dengan nol. pH<sub>pzc</sub> dapat ditentukan dari nilai titik temu antara garis lurus dari kurva pH awal terhadap ΔpH (pH akhir – pH awal). Metode penentuan pH<sub>pzc</sub> untuk material nZVI, SiO<sub>2</sub>, dan komposit nZVI-SiO<sub>2</sub> yaitu dengan memasukkan larutan NaNO<sub>3</sub> 0,01 M sebanyak 50 mL kedalam labu erlenmeyer. Masing-masing Erlenmeyer disesuaikan dengan pH awal larutan dalam rentang 2-12 dengan menambahkan HNO<sub>3</sub> 0,1 M atau NaOH 0,1 M, diukur dengan pH meter digital. Setelah itu setiap Erlenmeyer ditambahkan 0,2 gram material nZVI, SiO<sub>2</sub>, dan komposit nZVI-SiO<sub>2</sub>. Campuran tersebut diaduk menggunakan shaker dengan kecepatan 200 rpm selama 2 jam. Setelah di shaker, larutan didiamkan dengan suhu ruang selama 2 hari. pH akhir kemudian diukur menggunakan pH meter digital, dan pH<sub>pzc</sub> ditentukan dari titik perpotongan kurva pH awal dan akhir (Fairuzi *et al.*, 2026).

### 5. Karakterisasi Material

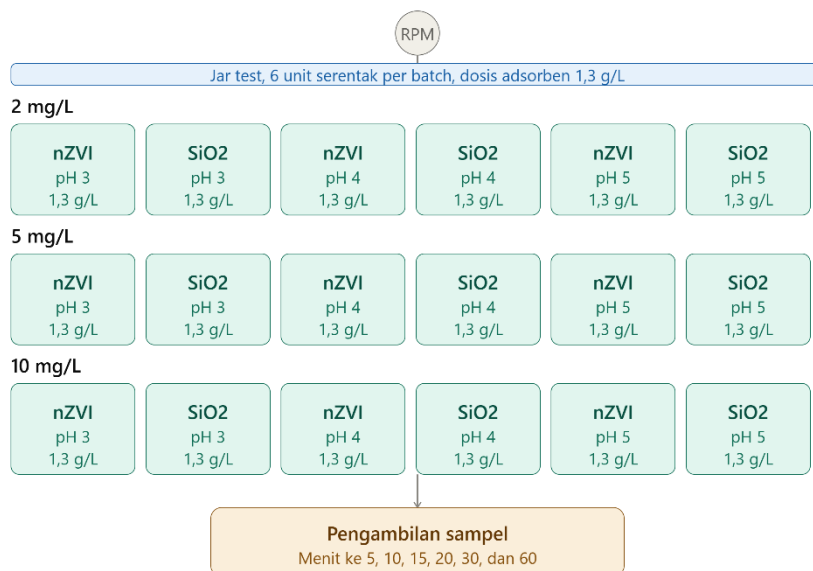
Dilakukan pengujian karakterisasi material dengan melakukan beberapa analisis sebagai berikut:

- Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX) untuk mengetahui karakteristik morfologi dan persebaran molekul dalam sampel komposit. Pengujian karakterisasi dilakukan di laboratorium SEM Teknik Mesin ITS.
- Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk mengetahui bahwa telah terjadi ikatan antara senyawa aktif yang ada pada komposit. Pengujian dilakukan di laboratorium Teknik Kimia Industri ITS.
- Adsorpsi-Desorpsi Nitrogen : Brunauer Emmett Teller (BET) untuk mengetahui ukuran luas permukaan dan distribusi ukuran pori dari adsorben. Pengujian dilakukan di laboratorium Research Center UPN Veteran Jawa Timur.
- Zeta Potensial  
Zeta potensial digunakan untuk menentukan apakah bahan aktif yang terisi dienkapsulasi di dalam pusat *nanocapsule* atau teradsorpsi ke dalam permukaan. Pengujian dilakukan di laboratorium Teknik Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

### 3.3.2 Uji Adsorpsi

- Reduksi ENR

Pembuatan larutan *ENR* diawali dengan menambahkan jumlah obat antibiotik yang diperlukan ke dalam beaker glass yang berisi air aquadest yang dilarutkan dengan menyesuaikan variasi konsentrasi target yang akan diadsorpsi yaitu sebesar 2 mg/L, 5 mg/L, dan 10 mg/L. Percobaan adsorpsi dilakukan dalam bentuk *batch* dengan menggunakan *jar test*. Larutan ENR dikondisikan dengan pH 4, 7, dan 9 dengan menambahkan HCl atau NaOH. Setelah mencapai pH yang diinginkan komposit NZVI, SiO<sub>2</sub> atau nZVI-SiO<sub>2</sub> ditambahkan sebanyak ke dalam beaker glass sebanyak 1,3 g/L yang dimana komposit tersebut bekerja sebagai adsorben. Dilakukan pengadukan selama proses reduksi dengan kecepatan 60 rpm. Setelah itu larutan diambil menggunakan *syringe filter* pada waktu 5, 10, 15, 20, 30, dan 60 menit sebanyak 5 mL. Berikut merupakan skema uji adsorpsi yang akan dilakukan yang disajikan pada gambar berikut.



**Gambar 3.2** Contoh Skema Uji Adsorpsi

Kemudian dilakukan pembacaan adsorbansi pada masing-masing larutan dengan menggunakan spektrofotometri Uv-Vis. Perhitungan kapasitas adsorpsi ( $q$ ) dalam mg/g dan Removal efficiency ( $E$ ) dalam % dari ENR dapat didapatkan dengan persamaan berikut:

$$q = \frac{(C_o - C_e)}{m} \times V$$

$$E = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100\%$$

Dimana  $C_o$  dan  $C_e$  (mg/L) merupakan konsentrasi ENR sebelum dan sesudah adsorpsi dalam larutan.  $V$  (L) adalah volume larutan adsorben dan  $m$  adalah massa dalam gram.

Efisiensi reduksi pada setiap variasi komposit memiliki dugaan nilai yang berbeda-beda. Analisa terkait pengaruh pengondisian pH larutan terhadap hasil adsorpsi dengan hipotesa pH berpengaruh dalam hasil adsorpsi konsentrasi ENR. Diperkirakan saat waktu pengambilan tertentu, hasil adsorbansi juga akan berbeda, hal ini dikarenakan waktu kontak antara adsorben dan adsorbat berbeda pula. Berikut merupakan variasi percobaan yang akan dilakukan.

**Tabel 3.1** Matriks Variasi Percobaan

| Konsentrasi ENR (mg/L) | pH | Material           | Waktu Pengambilan Sampel  |
|------------------------|----|--------------------|---------------------------|
|                        |    |                    | (menit)                   |
| 2                      | 3  | nZVI               | 5, 10, 15, 20, 30, dan 60 |
|                        |    | SiO <sub>2</sub> , |                           |
|                        | 4  | nZVI               | 5, 10, 15, 20, 30, dan 60 |
|                        |    | SiO <sub>2</sub> , |                           |
|                        | 5  | nZVI               | 5, 10, 15, 20, 30, dan 60 |
|                        |    | SiO <sub>2</sub> , |                           |
| 5                      | 3  | nZVI               | 5, 10, 15, 20, 30, dan 60 |
|                        |    | SiO <sub>2</sub> , |                           |
|                        | 4  | nZVI               | 5, 10, 15, 20, 30, dan 60 |
|                        |    | SiO <sub>2</sub> , |                           |
|                        | 5  | nZVI               | 5, 10, 15, 20, 30, dan 60 |
|                        |    | SiO <sub>2</sub> , |                           |
| 10                     | 3  | nZVI               | 5, 10, 15, 20, 30, dan 60 |
|                        |    | SiO <sub>2</sub> , |                           |
|                        | 4  | nZVI               | 5, 10, 15, 20, 30, dan 60 |
|                        |    | SiO <sub>2</sub> , |                           |
|                        | 5  | nZVI               | 5, 10, 15, 20, 30, dan 60 |
|                        |    | SiO <sub>2</sub> , |                           |

### 3.3.3 Analisis Data dan Pembahasan

Analisis data dilakukan berdasarkan hasil pengumpulan data. Data yang dianalisis meliputi karakteristik nZVI, SiO<sub>2</sub> dan komposit nZVI- SiO<sub>2</sub> menggunakan uji SEM-EDX, FTIR, BET. Analisis isoterm dilakukan dengan memodelkan hasil yang telah didapat kedalam konsep Freundlich dan Langmuir. Analisis kinetika adsorpsi dilakukan dengan menggunakan data pH dan konsentrasi ENR dengan hasil removal tertinggi. Data variasi waktu adsorpsi dianalisis menggunakan persamaan kinetika laju reaksi model *pseudo first orde* (PFO) dan *pseudo second orde* (PSO). Serta dilakukan perhitungan efisiensi penyisihan antibiotik ENR.

### 3.3.4 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan didapat dari hasil analisis yang telah dilakukan. Kesimpulan dibuat untuk menjawab tujuan dari penelitian yang dilakukan. Kesimpulan yang didapatkan berupa hasil identifikasi karakteristik nZVI, SiO<sub>2</sub>, dan nZVI- SiO<sub>2</sub> serta efektivitas nZVI dan SiO<sub>2</sub> dalam mereduksi ENR, serta pengaruh pH dan lama waktu adsorpsi terhadap hasil reduksi ENR. Sedangkan saran dibuat untuk memberi petunjuk dan pengembangan penelitian sejenis untuk lebih dikembangkan lagi, saran yang diberikan guna menyempurnakan penelitian.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Sintesis Material

Sintesis material pada penelitian ini menggunakan tiga tahap pembuatan material yaitu sintesis nano Zero-Valent Iron (nZVI), SiO<sub>2</sub>, dan nZVI-SiO<sub>2</sub>. Material merupakan bahan penyusun tunggal yaitu nZVI dan SiO<sub>2</sub>, di mana nZVI adalah partikel besi valensi nol berukuran nano yang bekerja terutama sebagai reduktor untuk menghilangkan atau menguraikan kontaminan, SiO<sub>2</sub> adalah silikon dioksida atau silika, berperan sebagai material pelapis yang bersifat relatif inert dan berfungsi menstabilkan partikel. Gabungan material nZVI dan SiO<sub>2</sub> disebut sebagai komposit nZVI-SiO<sub>2</sub> yang menggabungkan reaktivitas nZVI dengan stabilitas SiO<sub>2</sub>.

Sintesis nZVI dilakukan dengan menggunakan FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O dengan mereduksi senyawa Fe<sup>2+</sup> dan CTAB ditambahkan untuk menstabilkan partikel melalui cara fisik tanpa reaksi kimia. Pada proses reduksi, digunakan senyawa NaBH<sub>4</sub> sebagai agen pereduksi dalam suasana basa, yang distabilkan dengan penambahan NH<sub>4</sub>OH untuk mencegah hidrolisis NaBH<sub>4</sub> secara cepat, sehingga menghasilkan partikel nano dengan sifat magnetic dan mempunyai reaktivitas tinggi. Penambahan NH<sub>4</sub>OH pada proses ini bertujuan untuk menjaga pH pada proses reaksi. Pada saat penetesan NaBH<sub>4</sub> dialiri dengan gas N<sub>2</sub> fungsinya agar menghilangkan O<sub>2</sub> dari proses reaksi yang terjadi. Reaksi yang terjadi pada proses ini yaitu ion Fe<sup>2+</sup> mengalami reduksi menjadi Fe<sup>0</sup> oleh BH<sub>4</sub><sup>-</sup> sebagai pereduksi.

Sintesis silikon dioksida (SiO<sub>2</sub>) atau silika dari limbah *sandblasting* dilakukan melalui metode alkali fusion dengan penambahan NaOH sebagai sumber alkali. NaOH berfungsi sebagai agen pelebur (fluks) untuk menurunkan titik lebur SiO<sub>2</sub>, sehingga reaksi dapat berlangsung pada suhu 500°C. NaOH juga berfungsi sebagai pereaksi untuk memutus ikatan Si–O–Si pada struktur tetrahedral silika, sehingga terbentuk serbuk natrium silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>). Pada suhu tinggi, struktur tetrahedral silika saling terpisah karena ikatan antara kation Na<sup>+</sup> dan anion silikat bersifat lemah, sehingga NaOH bereaksi dengan SiO<sub>2</sub> membentuk natrium silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) yang terpisah dari mineral pengotor lain. Serbuk natrium silikat kemudian dilarutkan dalam akuades dan disaring untuk memisahkan pengotor yang tidak larut. Larutan natrium silikat selanjutnya dititrasi dengan HCl 2M, menghasilkan silika hidrat (H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) sebagai gel nanosilika, dengan natrium klorida (NaCl) sebagai produk samping (Rachman *et al.*, 2024). Reaksi kimia dari proses sintesis disajikan dalam persamaan berikut:



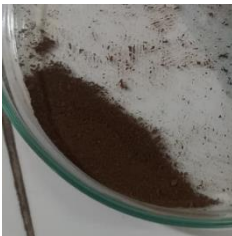
Mekanisme reaksi pembentukan natrium silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) diawali dengan interaksi nukleofilik ion OH<sup>-</sup> terhadap atom Si yang bermuatan parsial positif (δ<sup>+</sup>), membentuk intermediet [SiO<sub>2</sub>OH]<sup>-</sup> yang tidak stabil. Selanjutnya, intermediet tersebut mengalami deprotonasi oleh ion OH<sup>-</sup>, melepaskan ion H<sup>+</sup> yang berikatan dengan OH<sup>-</sup> membentuk molekul H<sub>2</sub>O, sehingga terbentuk ion metasilikat (SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>). Ion SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup> yang terbentuk kemudian berikatan secara ionik dengan dua ion Na<sup>+</sup> yang berasal dari NaOH secara ekuivalen, membentuk natrium silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) (Pote *et al.*, 2024).

Selanjutnya sintesis nZVI-SiO<sub>2</sub> dilakukan dengan menggunakan metode impregnasi koloid *in-situ* dengan mencampurkan SiO<sub>2</sub> dan FeCl<sub>3</sub> dengan pelarut etanol. Penggunaan etanol dalam reaksi berfungsi untuk menstabilkan partikel nZVI selama proses pembentukan. FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O yang digunakan sebagai prekursor utama dalam pembentukan fasa besi (Fe<sup>0</sup>) dalam komposit tersebut. Sementara itu, SiO<sub>2</sub> hasil sintesis limbah *sandblasting* berperan untuk melapisi partikel besi (Fe<sup>0</sup>) yang baru terbentuk. Kemudian ditambahkan agen pereduksi kuat berupa sodium borohidrida (NaBH<sub>4</sub>). Ion feri (Fe<sup>3+</sup>) direduksi oleh borohibrida dalam pelarut etanol (Archariyapanyakul *et al.*, 2017). Material besi yang direduksi oleh borohibrida digambarkan pada Persamaan 3.



Hasil pengamatan fisik material sintesis terdapat pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Hasil Pengamatan Fisik Material Sintesis

| Parameter | SiO <sub>2</sub>                                                                   | nZVI                                                                                | nZVI- SiO <sub>2</sub>                                                               |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Warna     |  |  |  |
| Bentuk    | Putih pekat<br>Serbuk halus                                                        | Coklat tua<br>Granular halus                                                        | Hitam pekat<br>Granular halus                                                        |

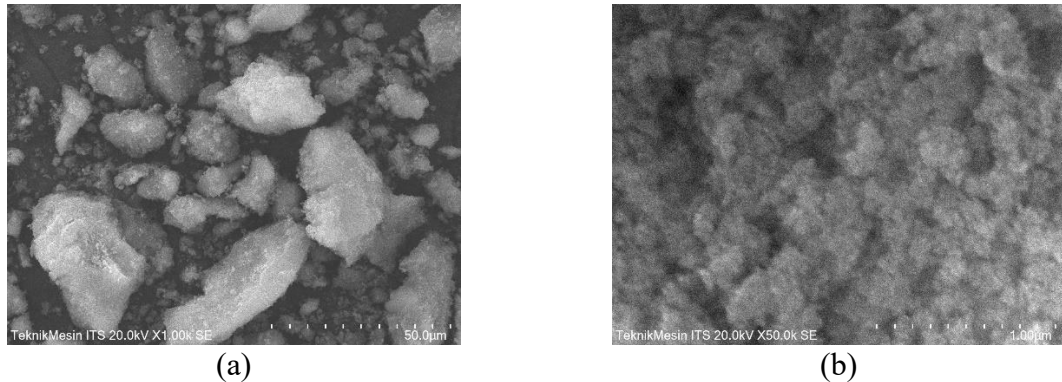
Berdasarkan Tabel 4.1 dapat diketahui bahwa SiO<sub>2</sub> berbentuk serbuk halus dengan warna putih pekat. Warna putih dihasilkan dari proses ekstraksi dengan metode kopresipitasi dengan menambahkan HCl ke dalam larutan sodium silika (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), kemudian terbentuk gel silika yang terbentuk gumpalan putih. Material nZVI yang diperoleh menunjukkan warna coklat tua dengan tekstur granular halus. Warna coklat ini umumnya berkaitan dengan terbentuknya lapisan oksida pada permukaan besi nol valensi, akibat dari adanya oksidasi parsial selama proses sintesis. Meskipun inti partikel masih berupa Fe<sup>0</sup>, permukaan nZVI sangat reaktif sehingga mudah mengalami oksidasi yang menyebabkan perubahan warna dari hitam menjadi coklat. Sementara itu, pada komposit nZVI-SiO<sub>2</sub> warna hitam pekat menunjukkan bahwa partikel besi nol valen lebih terdispersi dan terlindungi oleh matriks silika. Silika berperan sebagai penyangga atau pelapis yang dapat menghambat aglomerasi serta memperlambat oksidasi.

## 4.2 Karakterisasi Hasil Material

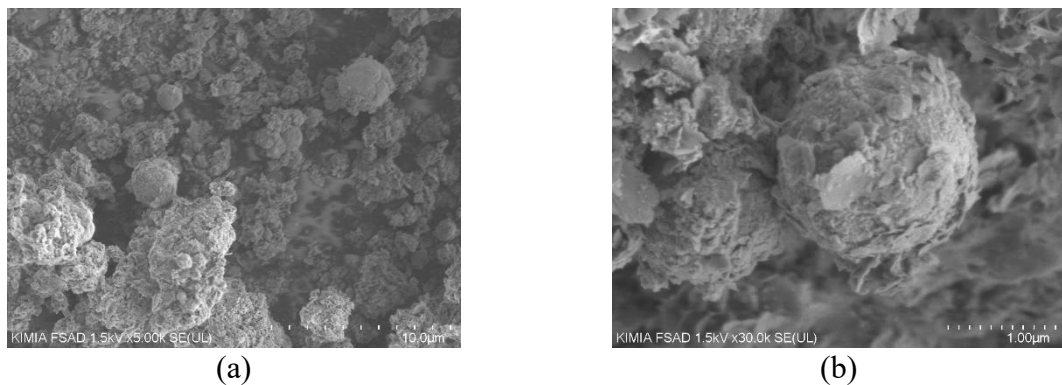
### 4.2.1 Analisis Scanning Electron Microscopy (SEM)

Hasil karakterisasi morfologi dan persebaran molekul pada material dapat diperoleh melalui pengujian dan analisis SEM, dimana hal ini penting karena permukaan suatu material dapat terlihat apakah memiliki sifat kasar, tidak rata, berpori, atau memiliki struktur spesifik serta melihat bagaimana persebaran partikel yang tersebar di material. Hasil dari analisis SEM pada setiap material terdapat pada Gambar 4.1-4.3. Permukaan SiO<sub>2</sub> pada Gambar 4.1 menunjukkan morfologi permukaan silika yang memiliki ukuran butir yang beragam tidak

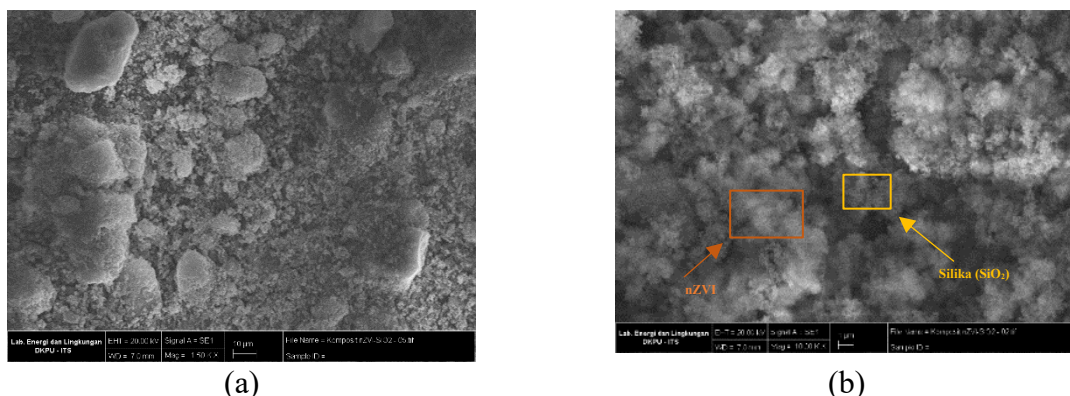
beraturan, berbentuk kasar, menggumpal dan mempunyai ukuran partikel yang bervariasi. Pada pembuatan sintesis silika dengan metode sol-gel menggunakan pH netral yang dimana komposisi OH<sup>-</sup> dan H<sup>+</sup> saling meniadakan yang menyebabkan aglomerasi partikel lebih mudah terjadi. Prekursor natrium silikat yang bersifat basa dinetralkan menggunakan asam klorida, sehingga proses kondensasi partikel berlangsung sangat cepat. Ion Na<sup>+</sup> tidak dapat menstabilkan partikel silika karena bereaksi dengan ion Cl<sup>-</sup> sehingga terbentuk NaCl yang mudah larut dalam air (Anugrahadi Habibie & Ulfa, 2023). Gambar 4.4 merupakan gambar ilustrasi dari reaksi kimia yang mengakibatkan partikel silika ter-aglomerasi.



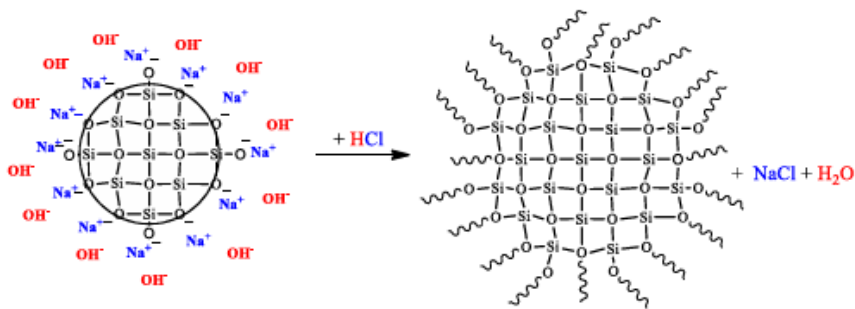
**Gambar 4.1** Morfologi Permukaan SiO<sub>2</sub> (a) Perbesaran 1000x (b) Perbesaran 50.000x



**Gambar 4.2** Morfologi Permukaan nZVI (a) Perbesaran 5000x (b) Perbesaran 30.000x



**Gambar 4.3** Morfologi Permukaan Komposit nZVI-SiO<sub>2</sub> (a) Perbesaran 1500x (b) Perbesaran 10.000x



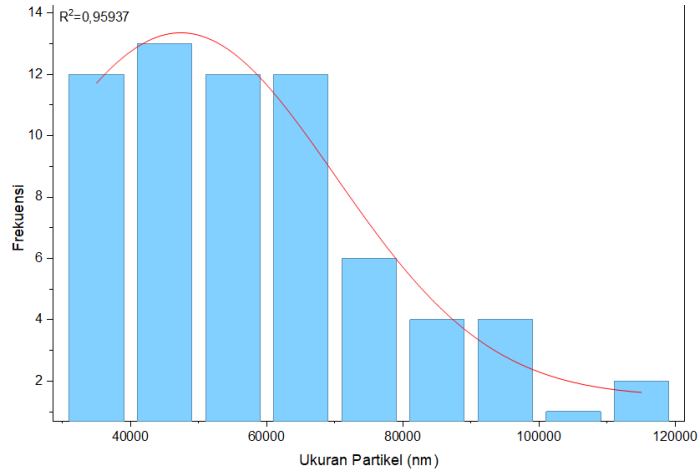
**Gambar 4.4** Aglomerasi Partikel Silika pada Metode Sol-Gel

Bentuk material dari nZVI berdasarkan hasil SEM yang terdapat pada Gambar 4.2 menunjukkan bahwa nZVI berbentuk bulat dengan permukaan tidak rata. Hal tersebut disebabkan karena adanya penggumpalan (agregasi) yang merupakan karakteristik umum dari nZVI sehingga memiliki sifat reaktif yang tinggi dan cenderung mengalami penggumpalan untuk menstabilkan energi permukaannya. Penyebab utama terjadinya aglomerasi pada nZVI adalah sifat magnetik alami atau gaya magnetik yang inheren pada partikel besi nol valensi ( $\text{Fe}^0$ ) tersebut. Pengamatan melalui karakterisasi SEM menunjukkan bahwa partikel-partikel tidak tersebar secara individual yang terisolasi, melainkan mengelompok dalam bentuk agregat (Dada *et al.*, 2020) Pada permukaan partikel terlihat adanya struktur yang menyerupai serpihan (*flake-like structures*). Struktur serpihan ini mengindikasikan bahwa partikel besi murni tersebut telah mengalami oksidasi pada permukaannya (Krawczyk *et al.*, 2021).

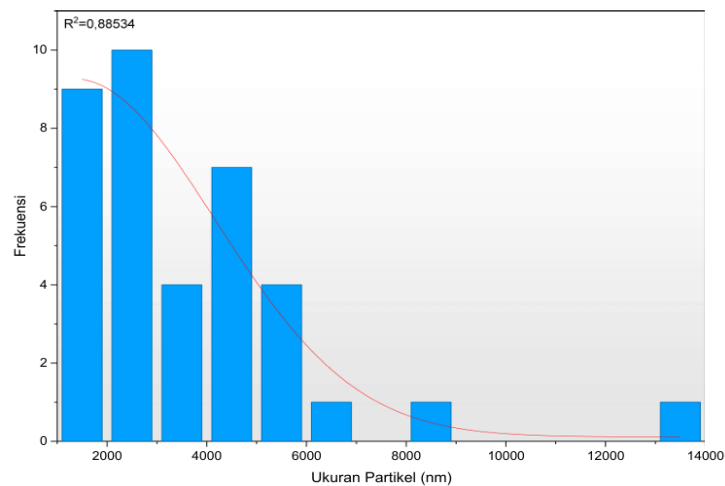
Dari hasil karakterisasi SEM pada Gambar 4.3 sintesis komposit nZVI- $\text{SiO}_2$ , terlihat bahwa material komposit memiliki morfologi berupa agregat partikel dengan bentuk yang tidak beraturan yang tersebar pada permukaan material. Permukaan tampak lebih kasar dan heterogen. Hasil analisis SEM menunjukkan tingkat disperse (penyebaran) partikel nZVI yang jauh lebih tinggi dan tingkat aglomerasi (penggumpalan) yang lebih rendah jika dibandingkan dengan nZVI murni. Secara fisik silika ( $\text{SiO}_2$ ) bertindak sebagai material penyokong yang memisahkan partikel besi nano (nZVI) sehingga membatasi terjadinya gaya tarik menarik alami yang memicu aglomerasi pada besi murni. Selain itu, partikel berukuran lebih kecil terlihat menyebar pada permukaan dan mengisi sebagian ruang antarpartikel, hal ini menunjukkan bahwa matriks penyangga mampu membantu menjaga penyebaran partikel selama proses sintesis berlangsung. Morfologi tersebut mengindikasikan terbentuknya material komposit dengan distribusi partikel yang relatif homogen pada permukaan.

Untuk memperkuat analisis morfologi permukaan tersebut, dilakukan pengukuran terhadap ukuran distribusi partikel melalui grafik yang disajikan pada Gambar 4.5-4.7. Gambar tersebut merupakan distribusi ukuran partikel menggunakan pengolahan data dengan *software imageJ* dan *software Origin* terhadap Gambar 4.1(a), 4.2(a) dan 4.3(a). Pengukuran partikel dilakukan dengan menggunakan *software imageJ* dan dilanjutkan dengan pengolahan data pengukuran diolah menggunakan *software Origin* dengan membuat grafik Gaussian. Pada partikel silika ( $\text{SiO}_2$ ) terdistribusi pada rentang ukuran yang cukup lebar, yaitu antara 30.000-120.000 nm. Ukuran partikel ini didominasi oleh fraksi berukuran kecil hingga sedang, dengan titik frekuensi tertinggi berada pada interval ukuran 40.000-50.000 nm. Dari hasil pengukuran distribusi partikel diperoleh ukuran rata-rata partikel  $\text{SiO}_2$  sebesar 47366 nm atau 47,36  $\mu\text{m}$ . Hasil analisis pada Gambar 4.6 menunjukkan bahwa distribusi ukuran partikel didominasi oleh partikel dengan ukuran pada rentang 1500-3000 nm, pola ini menunjukkan bahwa distribusi partikel bersifat cenderung ke kanan, dimana sebagian besar partikel berukuran relatif kecil sementara sebagian lainnya memiliki ukuran jauh lebih besar yang mengindikasikan bahwa adanya aglomerasi (penggumpalan) antar partikel nZVI. Dari grafik diperoleh ukuran rata-rata partikel

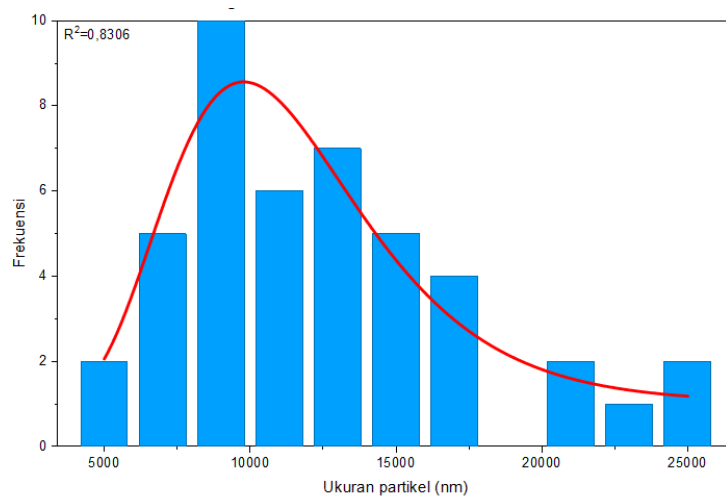
nZVI sebesar 1629 nm atau 1,63  $\mu\text{m}$ . Pada Gambar 4.7 partikel komposit nZVI-  $\text{SiO}_2$  terlihat bahwa partikel terdistribusi pada rentang 5.000-25.000 nm. Frekuensi partikel yang paling dominan berada pada ukuran kisaran 8.000-10.000 nm. Dari hasil pengukuran distribusi partikel diperoleh ukuran rata-rata partikel nZVI- $\text{SiO}_2$  sebesar 10.946 nm atau 10,94  $\mu\text{m}$



**Gambar 4.5** Distribusi Ukuran Partikel Material Silika



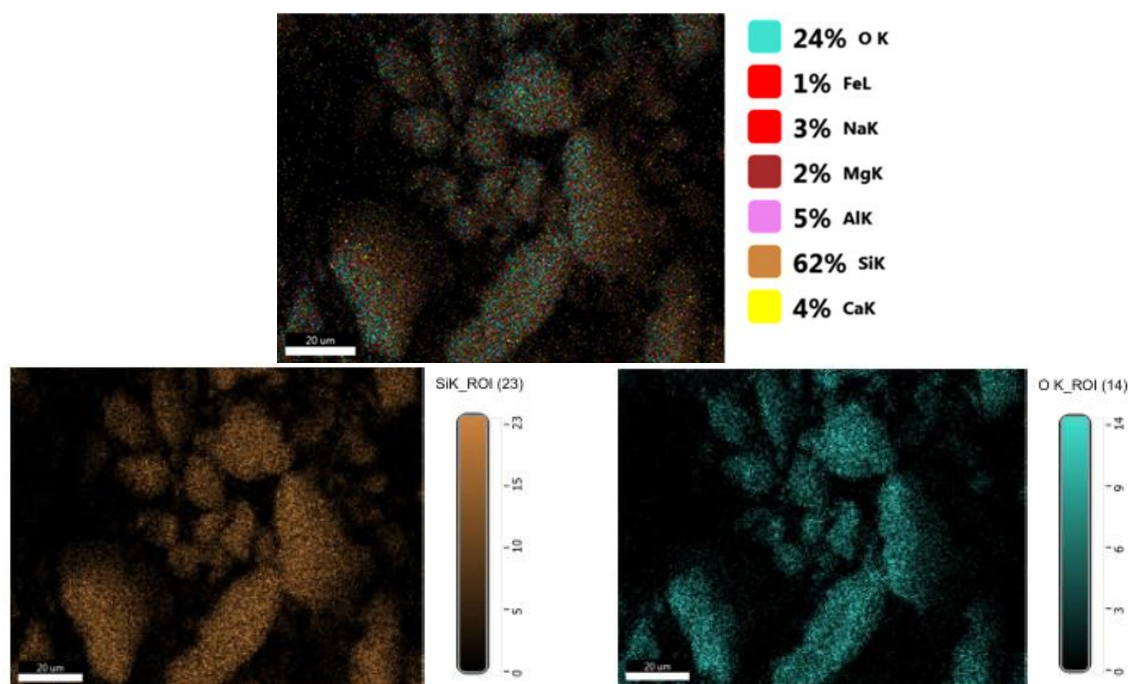
**Gambar 4.6** Distribusi Ukuran Partikel Komposit nZVI



**Gambar 4.7** Distribusi Ukuran Partikel Komposit nZVI- $\text{SiO}_2$

#### 4.2.2 Analisis *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDX)

Analisis EDX digunakan untuk mengidentifikasi dan memetakan distribusi unsur-unsur kimia yang ada pada permukaan material padat yang dianalisis. Analisis ini memberikan informasi terkait keberadaan unsur-unsur yang terbentuk selama proses sintesis. Melalui pemetaan EDX, dapat diketahui distribusi dari unsur pada material apakah homogen atau terdapat aglomerasi tertentu yang mempengaruhi kinerja adsorpsi. Komposisi dan distribusi unsur kimia pada material  $\text{SiO}_2$  dapat dilihat pada **Gambar 4.8** berikut.



**Gambar 4.8** Hasil EDX mapping material Silika Perbesaran 20.000x

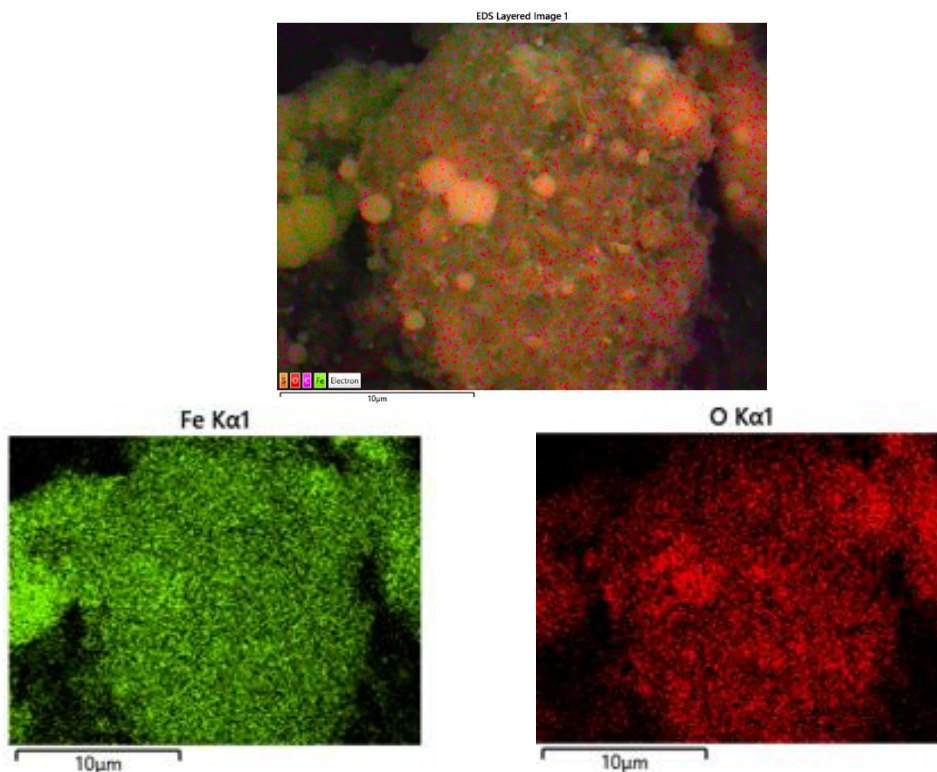
Dalam Gambar 4.8 tersebut menunjukkan distribusi spasial (penyebaran), dimana setiap titik warna mewakili unsur yang berbeda. warna coklat (Si, 62%) dan biru muda (O, 24%) adalah yang paling mendominasi yang menandakan bahwa partikel berbentuk blok atau gumpalan utama yaitu Silika ( $\text{SiO}_2$ ). Persentase komposisi unsur kimia juga diketahui dari hasil uji EDX. Berikut hasil persentase komposisi unsur kimia berdasarkan hasil uji EDX yang dapat dilihat pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Komposisi Unsur Material Silika

| Element | Mass (%) | Atom (%) |
|---------|----------|----------|
| O       | 51,26    | 64,96    |
| Fe      | 1,46     | 0,53     |
| Na      | 3,54     | 3,12     |
| Mg      | 0,69     | 0,58     |
| Al      | 2,52     | 1,89     |
| Si      | 38,95    | 28,12    |
| Ca      | 1,57     | 0,80     |

Dari **Tabel 4.2** menunjukkan kandungan silika paling tinggi yang ditunjukkan dengan kandungan unsur O sebesar 51,26% dan Si sebesar 38,95%. Hasil ini menunjukkan bahwa

sintesis limbah sandblasting dengan metode kopresipitasi memiliki kemurnian kandungan silika yang cukup tinggi. Hasil EDS juga mendeteksi adanya unsur lain seperti Fe, Na, Mg, Al, dan Ca dengan persentase kecil. Unsur-unsur ini biasanya merupakan pengotor alami yang berasal dari bahan limbah sandblasting yang digunakan, dimana pengotor tersebut belum sepenuhnya hilang selama proses pemurnian atau sintesis.



**Gambar 4.9** Hasil EDX mapping Komposit nZVI

Pada hasil Gambar 4.9 mapping EDX persebaran unsur Fe menunjukkan persebaran yang merata dan intens di seluruh area partikel, mengonfirmasi bahwa besi (Fe) merupakan komponen utama penyusun partikel. Peta berwarna merah menunjukkan sebaran oksigen yang merata pada permukaan partikel. Pada nZVI murni keberadaan oksigen berasal dari lapisan oksida atau hidroksida besi yang secara alami terbentuk pada permukaan partikel. Lapisan oksida ini membentuk struktur inti-cangkang (*core-shell*), dengan  $Fe^0$  sebagai inti dan lapisan oksida besi sebagai cangkang pelindung tipis di bagian luar.

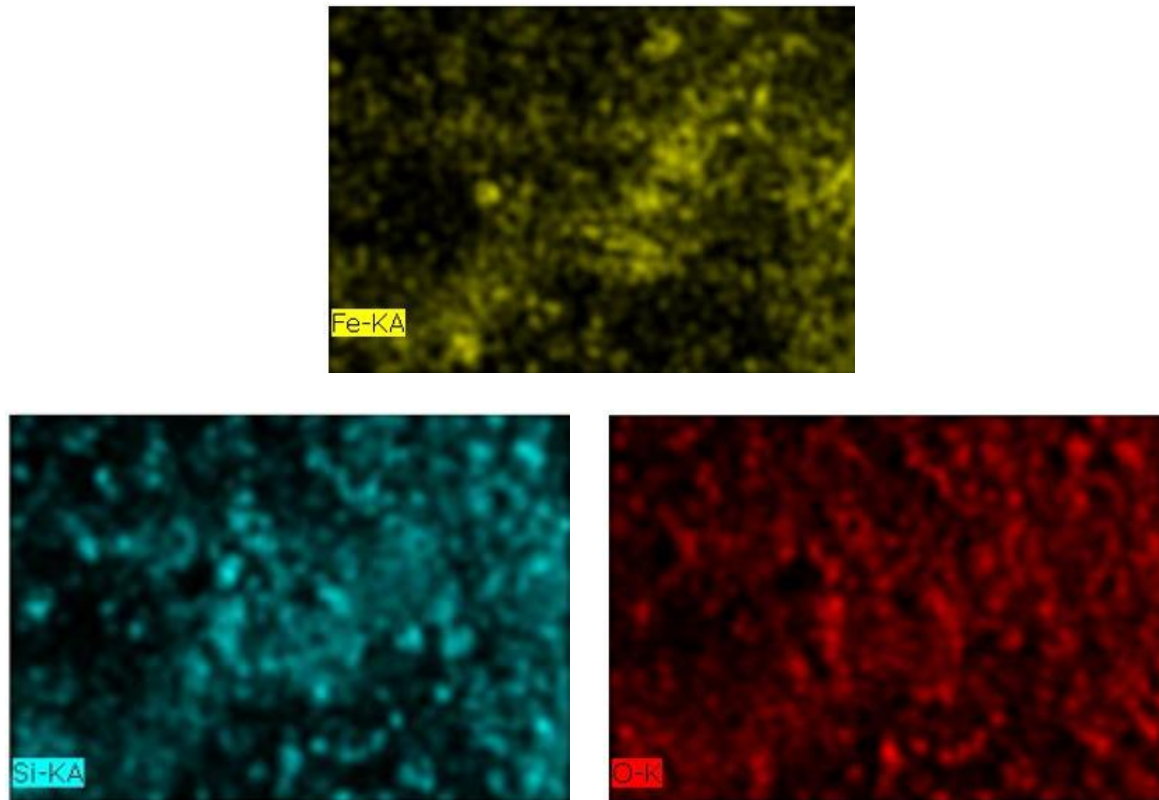
Persentase komposisi unsur kimia juga diketahui dari hasil uji EDX. Berikut hasil persentase komposisi unsur kimia berdasarkan hasil uji EDX dari material nZVI yang dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut.

**Tabel 4.3** Komposisi Unsur Material Komposit nZVI

| Element | Mass (%) |
|---------|----------|
| O       | 38,4     |
| Fe      | 32,4     |
| C       | 28,1     |
| S       | 1,1      |

Terlihat bahwa unsur oksigen merupakan unsur yang persentase massa tertinggi. Persentase tersebut lebih besar dibandingkan dengan Fe sehingga mengindikasikan bahwa

sebagian besar permukaan nZVI telah mengalami oksidasi dan membentuk lapisan oksida besi di sekeliling  $\text{Fe}^0$ . Hal ini sangat mungkin terjadi pada nZVI karena memiliki reaktivitas yang tinggi  $\text{Fe}^0$  terhadap oksigen. Adapun persebaran unsur pada komposit nZVI- $\text{SiO}_2$  terdapat pada Gambar 4.10. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa unsur Si, O, dan Fe pada komposit memiliki persebaran yang homogen.



**Gambar 4.10** Hasil EDX mapping Komposit nZVI- $\text{SiO}_2$

Dalam Gambar 4.10 menunjukkan bahwa unsur Fe, Si, dan O terdistribusi secara homogen pada permukaan komposit. Distribusi Fe yang menyebar pada area yang sama dengan Si mengindikasikan bahwa partikel besi berhasil terdepositasi pada matriks silika. Keberadaan silika sebagai penyangga dapat mengurangi aglomerasi antar partikel nZVI dan meningkatkan penyebaran partikel besi pada permukaan material. Persentase komposisi unsur kimia juga diketahui dari hasil uji EDX. Berikut hasil persentase komposisi unsur kimia berdasarkan hasil uji EDX yang dapat dilihat pada **Tabel 4.4** berikut.

**Tabel 4.4** Komposisi Unsur Material Komposit nZVI- $\text{SiO}_2$

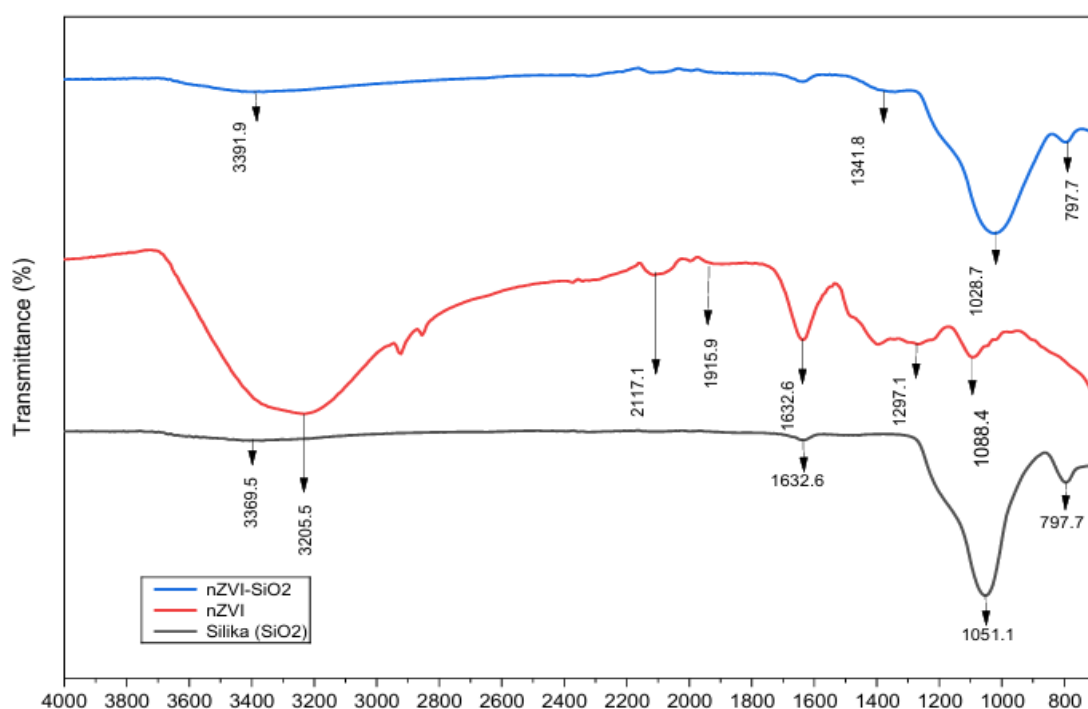
| Element | Mass (%) | Atom (%) |
|---------|----------|----------|
| O       | 52,96    | 59,06    |
| C       | 17,36    | 25,79    |
| Fe      | 12,57    | 4,01     |
| Si      | 12,55    | 7,97     |
| Na      | 2,91     | 2,26     |
| Ca      | 0,88     | 0,39     |
| Al      | 0,78     | 0,52     |

Terdapat empat unsur utama yang mendominasi material ini, yaitu Oksigen (O), Karbon (C), Besi (Fe), dan Silikon (Si). Tingginya kadar oksigen mengindikasikan bahwa sebagian

unsur logam dan metaloid dalam material berada dalam bentuk senyawa oksida. Hal ini sesuai dengan keberadaan matriks silika ( $\text{SiO}_2$ ). Keberadaan besi mengonfirmasi adanya partikel berbasis besi (nZVI) di dalam material. Keberadaan unsur silikon (Si) mengindikasikan bahwa tergabung kedalam sistem sintesis material. Rasio atom antara O dan Si yang melimpah mendukung terbentuknya jaringan ikatan siloksan Si-O-Si yang bertindak sebagai agen pendukung atau matriks penyangga bagi partikel besi agar tidak mudah mengalami aglomerasi maupun oksidasi. Kemunculan unsur Na, Ca, dan Al dapat dikategorikan sebagai pengotor. Unsur-unsur ini kemungkinan berasal dari sisa prekursor kimia yang digunakan selama proses sintesis atau berasal dari mineral bawaan bahan dasar dari sumber sintesis silika limbah sandblasting yang digunakan.

#### 4.2.3 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Uji FTIR pada penelitian ini digunakan untuk menganalisis ikatan kimia yang terbentuk dan pita serapan gugus fungsi. Dari pita serapan gugus fungsi yang didapatkan dengan melewati sinar inframerah dan akan berinteraksi dengan senyawa yang ada di dalam sampel, beberapa panjang gelombang sinar inframerah yang spesifik diserap oleh senyawa tersebut dengan daerah serapan.



**Gambar 4.11** Hasil Uji FTIR Material

Pada material Silika ( $\text{SiO}_2$ ) pada panjang gelombang  $3369.5 \text{ cm}^{-1}$  yaitu gugus Si-OH. Serapan gugus fungsi silika terdiri dari gugus Si-OH (Silanol) memiliki rentang gelombang sekitar 3000-3500. Kemudian terdapat serapan gugus fungsi serapan bending O-H dengan panjang gelombang 1632.6. Spektrum yang menunjukkan panjang gelombang 1600-1650  $\text{cm}^{-1}$  menunjukkan adanya molekul air yang teradsorpsi pada struktur silika. Pada pembacaan gelombang  $1051.1 \text{ cm}^{-1}$  adalah daerah spectral yang paling signifikan (sehubungan dengan Si) dengan getaran peregangan asimetris Si-O-Si atau bisa disebut juga sebagai puncak utama struktur silika. Pada panjang gelombang  $797.7 \text{ cm}^{-1}$  berkaitan dengan getaran peregangan

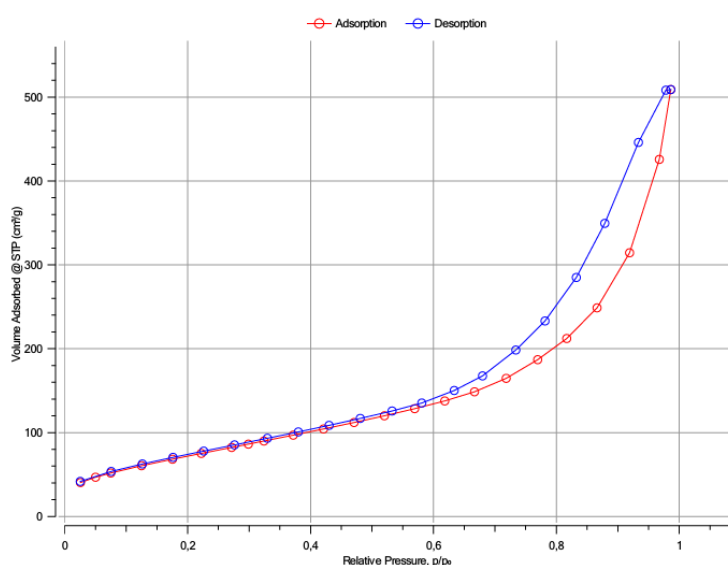
simetris Si-O-Si atau bisa disebut juga dengan vibrasi Si-O-Si bending yang berarti menguatkan bahwa struktur silika benar-benar telah terbentuk (Ellerbrock *et al.*, 2022).

Spektrum FTIR pada puncak serapan  $3205,5\text{ cm}^{-1}$  mengkonfirmasi keberadaan gugus hidroksil (-OH) yang menyebabkan terbentuknya lapisan oksihidroksida besi (FeOOH) di permukaan partikel akibat oksidasi  $\text{Fe}^0$  oleh oksigen. dan  $1632,6\text{ cm}^{-1}$  merupakan puncak vibrasi tekukan (bending) dari molekul air (H-O-H) atau air teradsorpsi pada permukaan nZVI. Pada puncak  $1297,1\text{ cm}^{-1}$  adalah vibrasi C-O atau Fe-OH. Puncak pada rentang  $1200\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$  dikaitkan dengan vibrasi regangan C-O dari residu organik atau gugus karboksilat, atau vibrasi Fe-OH dari lapisan hidroksida besi pada permukaan partikel. Akan tetapi untuk puncak serapan yang menandakan adanya gugus fungsi dari  $\text{Fe}^0$  sebesar  $560\text{--}620\text{ cm}^{-1}$  akan tetapi dalam uji FTIR tersebut puncak serapan tidak muncul dalam rentang angka tersebut.

Untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang spesifik dan mengkonfirmasi keberhasilan dari material komposit nZVI-SiO<sub>2</sub> didapatkan hasil spektrum FTIR pada puncak serapan yang melebar pada daerah  $3391,9\text{ cm}^{-1}$  merupakan karakteristik dari vibrasi regangan gugus hidroksil (-OH). Keberadaan gugus ini mengindikasikan adanya molekul air (H<sub>2</sub>O) bebas yang teradsorpsi secara fisik pada permukaan komposit, atau berasal dari gugus silanol (Si-OH). Pada panjang gelombang  $1028,7\text{ cm}^{-1}$  puncak ini merupakan vibrasi regangan asimetris dari ikatan siloksan (Si-O-Si). Pada panjang gelombang  $797,7\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya vibrasi regangan simetris dari ikatan Si-O pada gugus silanol.

#### 4.2.4 Analisis *Brunauer-Emmet-Teller* (BET)

Berdasarkan hasil pengujian sifat fisik material didapatkan hasil material silika memiliki luas permukaan BET tertinggi sebesar  $278,721\text{ m}^2/\text{g}$ , nilai menunjukkan bahwa silika memiliki struktur berpori dengan luas permukaan yang cukup tinggi. Dengan struktur pori yang baik, silika memiliki banyak situs aktif untuk menyerap polutan antibiotik ENR melalui efek sinergis dalam komposit. Pori pada silika memiliki volume  $0,76\text{ cm}^3/\text{g}$  dengan diameter. Pori pada silika memiliki volume  $0,76\text{ cm}^3/\text{g}$  dengan diameter rata-rata pori sebesar  $7,317\text{ nm}$ , yang menunjukkan bahwa silika memiliki karakteristik mesopori (2-50 nm).

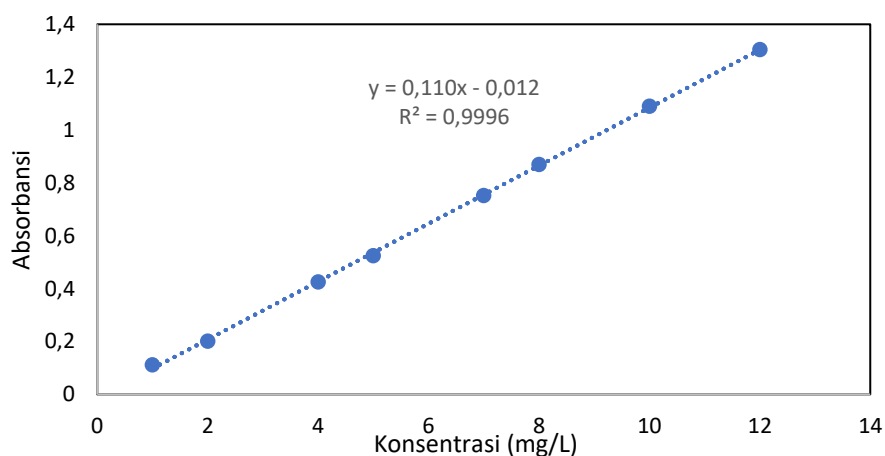


**Gambar 4.12** Grafik Isoterm Adsorpsi-Desorpsi Silika

Dari Gambar 4.12 dapat dianalisis tipe isotherm berdasarkan klasifikasi IUPAC. Berdasarkan analisis kurva isothermal adsorpsi-desorpsi, silika menunjukkan pola peningkatan jumlah adsorbat secara signifikan pada tekanan relatif tinggi dengan nilai  $P/P_0$  mendekati 1. Grafik ini menunjukkan isotherm adsorpsi tipe IV dengan histeresis yang menandakan material silika bersifat mesopore yang dimana permukaannya tidak hanya menyerap pada permukaan luar, tetapi juga memiliki pori menengah yang berperan dalam proses adsorpsi. Isotherm tipe IV diklasifikasikan sebagai material hidrofilik, dimana material ini memiliki kapasitas adsorpsi air sangat tinggi yang diukur pada  $P/P_0$  rendah dan sedang (Syahbardia *et al.*, 2019). Karena bentuk kurvanya yang tidak datar dan tidak menunjukkan kurva yang mendatar (plateau), material silika kemungkinan memiliki distribusi ukuran pori yang beragam.

#### 4.3. Penentuan Kurva Kalibrasi ENR

Dalam menentukan kurva kalibrasi ENR diperlukan pembuatan larutan standar dengan cara mengencerkan larutan antibiotik ENR dengan konsentrasi tertentu. Pembuatan kurva kalibrasi menggunakan konsentrasi 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 12 mg/L, dengan menggunakan pembacaan spektrofotometer Uv-vis dengan panjang gelombang 271 nm. Pemilihan panjang gelombang 271 nm melalui percobaan pembacaan gelombang untuk antibiotik berjenis ENR yang dilakukan pada rentang 230–325 nm (Li *et al.*, 2022). Didapatkan persamaan regresi linear  $y = 0,110x - 0,012$  dengan koefisien korelasi ( $R^2$ ) sebesar 0,9996. Persamaan regresi linier digunakan untuk menyatakan hubungan linear antara dua variabel atau lebih.



Gambar 4.13 Kurva Kalibrasi ENR

#### 4.4 Hasil Analisis HPLC Enrofloxacin

Analisis menggunakan *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) digunakan untuk memverifikasi terhadap hasil pengukuran konsentrasi ENR yang dibuat saat preparasi larutan yang dimana konsentrasi tersebut belum tentu mencerminkan konsentrasi actual senyawa target. Hasil analisis terhadap larutan ENR pada variasi konsentrasi 2, 5, dan 10 mg/L.

Tabel 4.5 Konsentrasi Hasil Pengukuran HPLC

| Konsentrasi Sampel Larutan | Konsentrasi Standar (ENR Murni) |
|----------------------------|---------------------------------|
| 2 mg/L                     | <0,01 mg/L                      |
| 5 mg/L                     | 0,3 mg/L                        |

|         |             |
|---------|-------------|
| 10 mg/L | 2,8488 mg/L |
|---------|-------------|

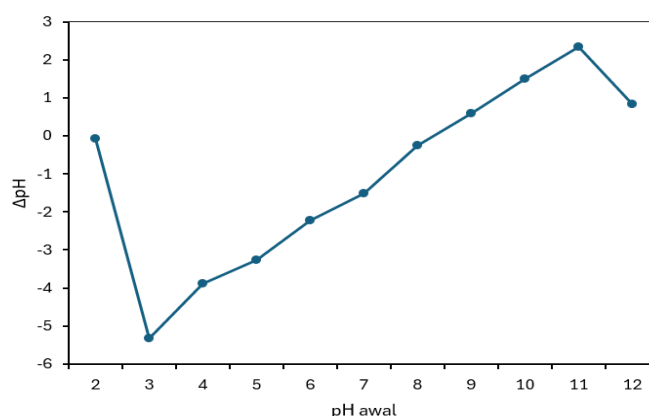
Berdasarkan Tabel 4.5 terlihat bahwa konsentrasi hasil pengukuran HPLC menunjukkan nilai yang berbeda dengan konsentrasi sampel larutan. Perbedaan ini mengindikasikan perlunya konfirmasi lebih lanjut terkait faktor pengenceran maupun stabilitas senyawa ENR selama preparasi larutan.

#### 4.5 Pengaruh pH

ENR memiliki karakteristik fisiokimia yaitu sifat zwitterion (molekul bermuatan ganda, akan tetapi bersifat netral pada rentang pH tertentu) yang sangat bergantung pada nilai pKa nya. Pada lingkungan ENR memiliki pH netral yaitu 6-7. Molekul ini tidak membawa muatan neto (paling stabil) ketika pH lingkungan berada di antara dua nilai konstanta disosiasi asamnya (pKa). Nilai pKa menunjukkan pada tingkat pH berapa suatu molekul akan melepaskan atau menerima proton, yang akan menentukan apakah molekul akan bermuatan positif, negatif, atau netral. Molekul zwitterion berada diantara dua nilai pKa nya yaitu pKa1 berkisar antara 5,88-6,06 (terkait dengan gugus asam karboksilat) dan pKa2 berkisar 7,70-7,74 (terkait dengan gugus amina tersier). Kondisi paling stabil dari molekul ini dalam larutan berada di antara kedua nilai pKa tersebut (Troughon & Lefebvre, 2016). Interaksi antara pH dan pKa menentukan keberhasilan proses adsorpsi. Jika pH lingkungan mendekati nilai pKa molekul dan nilai pH-pzc (titik muatan nol) dari adsorben, hal tersebut dapat mempengaruhi interaksi yang terjadi yaitu repulsi (tolak menolak) atau atraksi (tarik-menarik) elektrostatis (Berges *et al.*, 2021).

**Tabel 4.6** Hasil Pengujian dan Analisis pH-pzc Material SiO<sub>2</sub>

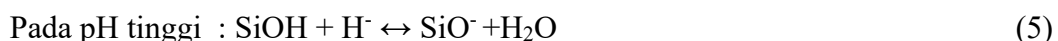
| pH awal (pHi) | pH Akhir (pHa) | $\Delta$ pH |
|---------------|----------------|-------------|
| 2             | 2,08           | -0,08       |
| 3             | 8,32           | -5,32       |
| 4             | 7,88           | -3,88       |
| 5             | 8,26           | -3,26       |
| 6             | 8,22           | -2,22       |
| 7             | 8,51           | -1,51       |
| 8             | 8,25           | -0,25       |
| 9             | 8,42           | 0,58        |
| 10            | 8,5            | 1,5         |
| 11            | 8,67           | 2,33        |
| 12            | 11,16          | 0,84        |



**Gambar 4.14** Penentuan pH-pzc SiO<sub>2</sub>

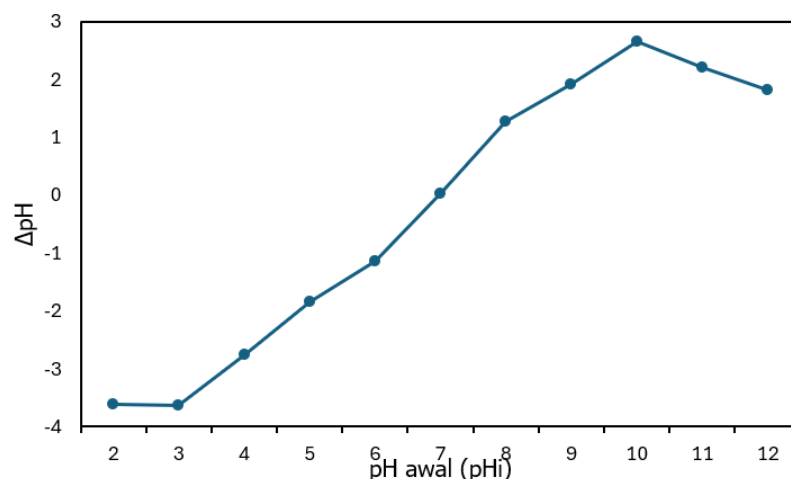
Nilai pH-pzc merupakan nilai pH larutan di mana muatan permukaan bersifat netral dan nilai pH larutan di mana permukaannya bermuatan positif ketika  $\text{pH} < \text{pH-pzc}$  atau negatif ketika  $\text{pH} > \text{pH-pzc}$ . Sifat ini penting untuk aplikasi adsorpsi pada fasa cair adsorbat dalam bentuk terionisasinya, karena pH larutan dapat diatur untuk mencapai penghilangan kontaminan tertinggi (Himawana *et al.*, 2022). Hasil perhitungan dan analisis pH-pzc pada material  $\text{SiO}_2$  dan nZVI dapat ditunjukkan pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 berikut. Dari data selisih pH yang didapatkan maka pH-pzc dapat ditentukan dengan membuat grafik antara pH awal (pHi) sebagai sumbu x dan  $\Delta\text{pH}$  sebagai sumbu y, di mana pH-pzc dapat diperoleh ketika titik pada grafik  $\Delta\text{pH}$  Adalah nol ( $\Delta\text{pH}=0$ ).

Berdasarkan Gambar 4.14 pH-pzc pada material  $\text{SiO}_2$  adalah 2. Dalam kondisi tersebut permukaan material silika dalam keadaan netral secara elektrik. Teknik dalam penentuan pH-pzc didasarkan pada asumsi bahwa proton  $\text{H}^+$  dan gugus hidroksil  $\text{OH}^-$  adalah ion penentu potensial. Silika mampu mengadsorpsi ion  $\text{H}^+$  atau  $\text{OH}^-$ , apabila pH permukaan memiliki muatan nol yang dikenal sebagai pH-pzc. Hasil tersebut sama dengan peneliti sebelumnya. Beberapa peneliti sebelumnya juga menyebutkan bahwa pH-pzc dari silika pada kisaran pH sekitar 1,5-4,5. Namun metode eksperimental yang digunakan kurang sensitif pada rentang pH yang disebutkan di atas (terutama dari pH 1,5-3) (Milonjić *et al.*, 2007). pH-pzc dari silika umumnya berada pada rentang pH 2-3 dalam banyak penelitian, akan tetapi beberapa peneliti sebelumnya memiliki nilai pH yang lebih tinggi dari nilai pH tersebut (Cho *et al.*, 2014). Adsorben silika di dalam air akan membentuk silanol ( $\text{SiOH}$ ), yang memiliki gugus fungsional aktif -OH. Pada pH rendah  $\text{SiOH}$  terprotonasi menjadi bermuatan positif membentuk  $\text{SiOH}_2^+$ , dan pada pH tinggi terdeprotonasi menjadi bermuatan negatif membentuk  $\text{SiO}^-$ . Perbedaan muatan pada permukaan silika akibat dari adanya perbedaan pH sistem yang sangat berpengaruh pada perilaku adsorpsi (Ikhsan *et al.*, 2015). Sama seperti pada permukaan logam oksida lainnya, mengikuti reaksi kimia yang dapat dilihat pada persamaan 4 dan 5.



**Tabel 4.7** Hasil Pengujian dan Analisis pH-pzc Material nZVI

| pH awal<br>(pHi) | pH Akhir<br>(pHa) | $\Delta\text{pH}$ |
|------------------|-------------------|-------------------|
| 2                | 5,62              | -3,62             |
| 3                | 6,63              | -3,63             |
| 4                | 6,76              | -2,76             |
| 5                | 6,84              | -1,84             |
| 6                | 7,15              | -1,15             |
| 7                | 6,97              | 0,03              |
| 8                | 6,72              | 1,28              |
| 9                | 7,09              | 1,91              |
| 10               | 7,34              | 2,66              |
| 11               | 8,8               | 2,2               |
| 12               | 10,19             | 1,81              |



**Gambar 4.15** Penentuan pH-pzc nZVI

Berdasarkan Gambar 4.15 hasil dari grafik penentuan pH-pzc dari nZVI didapatkan nilainya sebesar 6,97. Dalam kondisi pH tersebut permukaan material nZVI dalam keadaan netral secara elektrik. nZVI murni umumnya memiliki rentang titik muatan nol antara pH 7 hingga 9 karena adanya lapisan oksida besi di permukaannya (Arshadi *et al.*, 2014) Untuk nZVI tanpa ion, zeta potensial selalu positif pada pH rendah (<7,2-7,9) dimana seiring dengan penurunan pH, terjadi protonasi sehingga lebih banyak proton akan tersedia dan keberadaan  $H^+$  mendorong pembentukan kompleks Fe(II) (Ibrahim *et al.*, 2020).

#### 4.6 Analisis Hasil Uji Adsorpsi

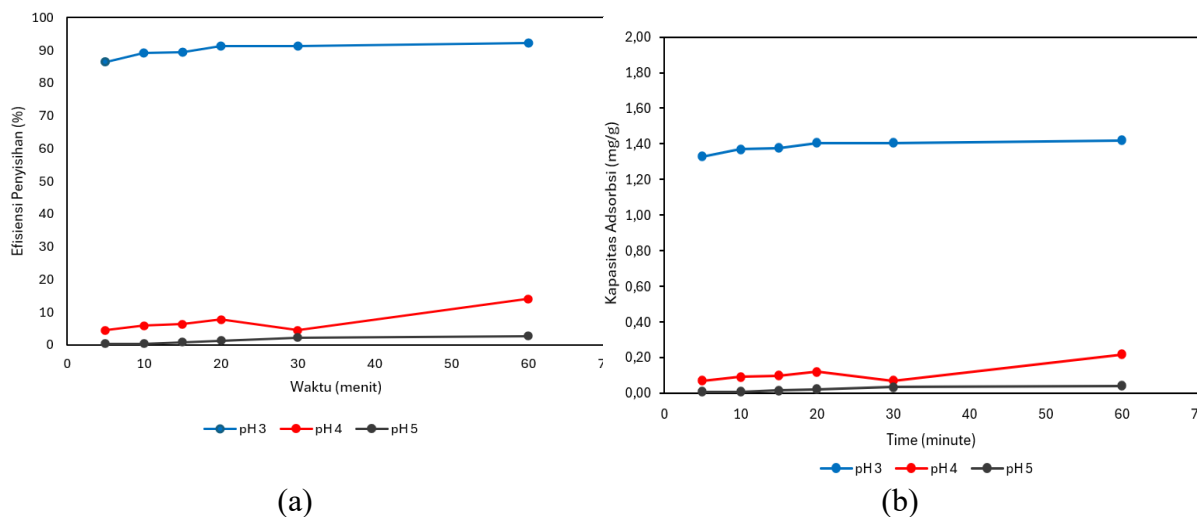
##### 4.6.1 Perhitungan Konsentrasi ENR setelah Proses Adsorpsi

Hasil perhitungan efisiensi penyisihan (*removal efficiency*) dan kapasitas adsorpsi (Q) pada seluruh variasi pH dan konsentrasi ENR selanjutnya dianalisis untuk mengidentifikasi kondisi optimum serta faktor-faktor yang memengaruhi kinerja adsorpsi pada masing-masing material. Berikut merupakan hasil dari perhitungan efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi.

**Tabel 4. 8** Hasil Adsorpsi Silika Pada Konsentrasi 2 mg/L

| pH | Waktu | Ct   | Co | E (%) | Q (mg/g) | Ct/Co |
|----|-------|------|----|-------|----------|-------|
| 3  | 5     | 0,27 | 2  | 86,36 | 1,329    | 0,14  |
|    | 10    | 0,22 | 2  | 89,09 | 1,371    | 0,11  |
|    | 15    | 0,21 | 2  | 89,55 | 1,378    | 0,10  |
|    | 20    | 0,17 | 2  | 91,36 | 1,406    | 0,09  |
|    | 30    | 0,17 | 2  | 91,36 | 1,406    | 0,09  |
|    | 60    | 0,15 | 2  | 92,27 | 1,420    | 0,08  |
| 4  | 5     | 1,91 | 2  | 4,55  | 0,070    | 0,95  |
|    | 10    | 1,88 | 2  | 5,91  | 0,091    | 0,94  |
|    | 15    | 1,87 | 2  | 6,36  | 0,098    | 0,94  |
|    | 20    | 1,85 | 2  | 7,73  | 0,119    | 0,92  |
|    | 30    | 1,91 | 2  | 4,55  | 0,070    | 0,95  |
|    | 60    | 1,72 | 2  | 14,09 | 0,217    | 0,86  |
| 5  | 5     | 1,99 | 2  | 0,45  | 0,007    | 1,00  |

| pH | Waktu | Ct   | Co | E (%) | Q (mg/g) | Ct/Co |
|----|-------|------|----|-------|----------|-------|
|    | 10    | 1,99 | 2  | 0,45  | 0,007    | 1,00  |
|    | 15    | 1,98 | 2  | 0,91  | 0,014    | 0,99  |
|    | 20    | 1,97 | 2  | 1,36  | 0,021    | 0,99  |
|    | 30    | 1,95 | 2  | 2,27  | 0,035    | 0,98  |
|    | 60    | 1,95 | 2  | 2,73  | 0,042    | 0,97  |

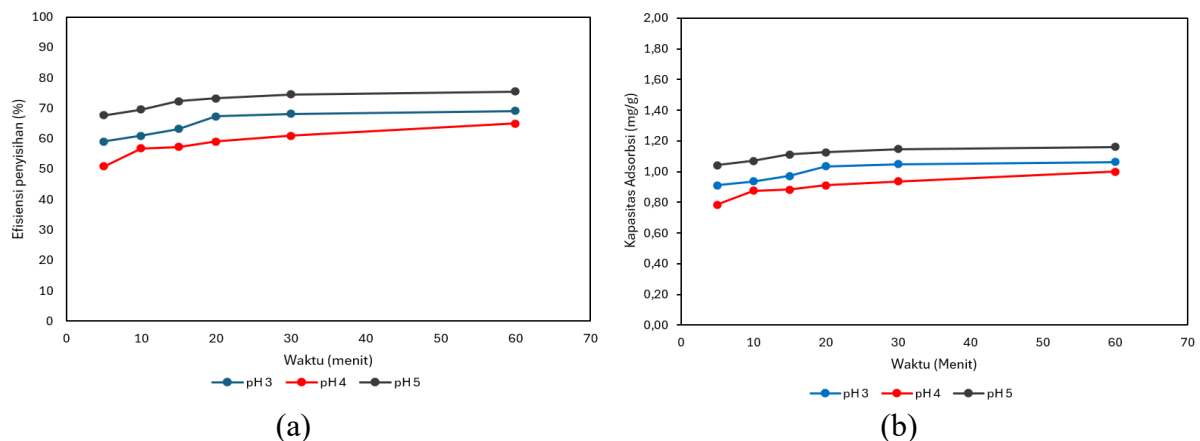


**Gambar 4.16** (a) Efisiensi Penyisihan dan (b) Kapasitas Adsorpsi Silika terhadap Enrofloxacin pada Konsentrasi 2 mg/L dengan Variasi pH dan Waktu Kontak

Berdasarkan Tabel 4.8 pada pH 3 nilai E meningkat dari 86% hingga 92% pada menit ke-60. Kapasitas adsorpsi (Q) meningkat seiring dengan lamanya waktu, dengan mencapai kapasitas maksimum sebesar 1,42 mg/g pada waktu ke 60 menit. Pada silika rasio Ct/Co menurun disetiap waktunya dengan nilai terendah sebesar 0,08 pada waktu 60 menit. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar adsorbat telah berhasil terikat pada permukaan adsorben. Fase kesetimbangan berlangsung antara menit ke-20 hingga ke-60, kenaikan efisiensi penyerapan mulai melambat dan cenderung konstan. Hal ini menunjukkan bahwa situs aktif adsorben telah mulai jenuh dan sistem mulai mencapai titik kesetimbangan. Pada pH 4 dan 5 terjadi penurunan performa adsorpsi yang sangat drastis, di mana pada pH 4 efisiensi hanya berkisar 4,55% hingga 14%. Dengan nilai E tertinggi sebesar 14% pada waktu ke 60 menit. Kapasitas adsorpsi (Q) meningkat seiring dengan lamanya waktu, dengan mencapai kapasitas maksimum sebesar 0,217 mg/g pada waktu ke 60 menit. Terdapat fluktuasi data pada menit ke-30 efisiensi turun menjadi 4,55% lalu naik Kembali ke 14% di menit ke-60. Hal ini bisa disebabkan oleh faktor teknis saat pengujian (seperti homogenitas pengadukan). Begitu pula dengan pH 5 nilai E tertinggi berada di menit ke-60 sebesar 2,73%. Pada pH 5 nilai Ct/Co betahan di angka 1 hingga 0,97 yang mengindikasikan bahwa tidak ada perubahan konsentrasi adsorbat di dalam larutan atau hamper tidak terjadinya proses adsorpsi.

**Tabel 4. 9** Hasil Adsorpsi nZVI Pada Konsentrasi 2 mg/L

| pH | Waktu | Ct   | Co | E (%) | Q (mg/g) | Ct/Co |
|----|-------|------|----|-------|----------|-------|
| 3  | 5     | 0,82 | 2  | 59,09 | 0,909    | 0,41  |
|    | 10    | 0,78 | 2  | 60,91 | 0,937    | 0,39  |
|    | 15    | 0,74 | 2  | 63,18 | 0,972    | 0,37  |
|    | 20    | 0,65 | 2  | 67,27 | 1,035    | 0,33  |
|    | 30    | 0,64 | 2  | 68,18 | 1,049    | 0,32  |
|    | 60    | 0,62 | 2  | 69,09 | 1,063    | 0,31  |
| 4  | 5     | 0,98 | 2  | 50,91 | 0,783    | 0,49  |
|    | 10    | 0,86 | 2  | 56,82 | 0,874    | 0,43  |
|    | 15    | 0,85 | 2  | 57,27 | 0,881    | 0,43  |
|    | 20    | 0,82 | 2  | 59,09 | 0,909    | 0,41  |
|    | 30    | 0,78 | 2  | 60,91 | 0,937    | 0,39  |
|    | 60    | 0,70 | 2  | 65,00 | 1,000    | 0,35  |
| 5  | 5     | 0,65 | 2  | 67,73 | 1,042    | 0,32  |
|    | 10    | 0,61 | 2  | 69,55 | 1,070    | 0,30  |
|    | 15    | 0,55 | 2  | 72,27 | 1,112    | 0,28  |
|    | 20    | 0,54 | 2  | 73,18 | 1,126    | 0,27  |
|    | 30    | 0,51 | 2  | 74,55 | 1,147    | 0,25  |
|    | 60    | 0,49 | 2  | 75,45 | 1,161    | 0,25  |

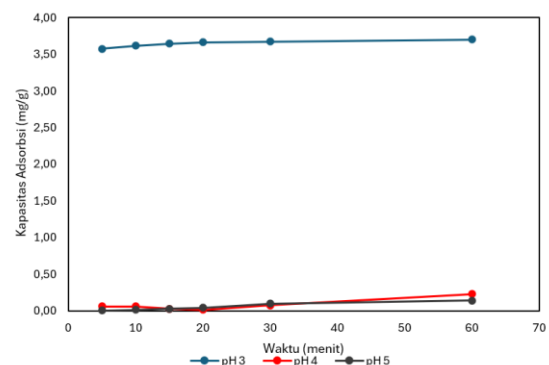
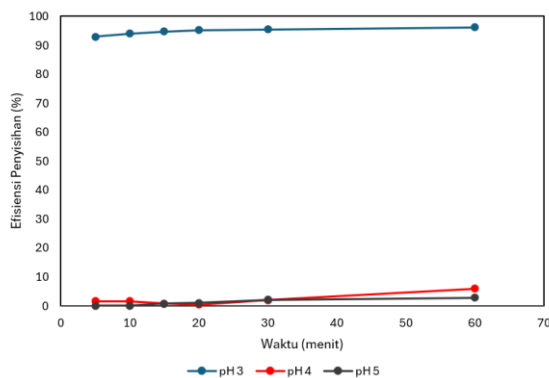


**Gambar 4.17** (a) Efisiensi Penyisihan dan (b) Kapasitas Adsorpsi nZVI terhadap Enrofloxacin pada Konsentrasi 2 mg/L dengan Variasi pH dan Waktu Kontak

Berdasarkan Tabel 4.9 menunjukkan bahwa pada pH 3 efisiensi penyisihan menghasilkan nilai pada rentang 59,09%-69,09% dengan kapasitas adsorpsi 0,909-1,063 mg/g, sedangkan pada pH 4 efisiensi cenderung lebih rendah yaitu 56,91%-57,27% dengan kapasitas adsorpsi 0,783-0,881 mg/g. Efisiensi penyisihan yang paling optimum diperoleh pada pH 5, dimana peningkatan waktu kontak dari 5 hingga 60 menit efisiensi adsorpsi naik dari 67,73% menjadi 75,45% dan kapasitas meningkat dari 1,042-1,161 mg/g.

**Tabel 4.10** Hasil Adsorpsi Silika Pada Konsentrasi 5 mg/L

| pH | Waktu | Ct   | Co | E (%) | Q (mg/g) | Ct/Co |
|----|-------|------|----|-------|----------|-------|
| 3  | 5     | 0,35 | 5  | 92,91 | 3,573    | 0,07  |
|    | 10    | 0,30 | 5  | 94,00 | 3,615    | 0,06  |
|    | 15    | 0,26 | 5  | 94,73 | 3,643    | 0,05  |
|    | 20    | 0,24 | 5  | 95,27 | 3,664    | 0,05  |
|    | 30    | 0,23 | 5  | 95,45 | 3,671    | 0,05  |
|    | 60    | 0,19 | 5  | 96,18 | 3,699    | 0,04  |
| 4  | 5     | 4,92 | 5  | 1,64  | 0,063    | 0,98  |
|    | 10    | 4,92 | 5  | 1,64  | 0,063    | 0,98  |
|    | 15    | 4,96 | 5  | 0,73  | 0,028    | 0,99  |
|    | 20    | 4,98 | 5  | 0,36  | 0,014    | 1,00  |
|    | 30    | 4,90 | 5  | 2,00  | 0,077    | 0,98  |
|    | 60    | 4,70 | 5  | 6,00  | 0,231    | 0,94  |
| 5  | 5     | 4,99 | 5  | 0,18  | 0,007    | 1,00  |
|    | 10    | 4,98 | 5  | 0,36  | 0,014    | 1,00  |
|    | 15    | 4,96 | 5  | 0,73  | 0,028    | 0,99  |
|    | 20    | 4,95 | 5  | 1,09  | 0,042    | 0,99  |
|    | 30    | 4,87 | 5  | 2,55  | 0,098    | 0,97  |
|    | 60    | 4,82 | 5  | 3,64  | 0,140    | 0,96  |



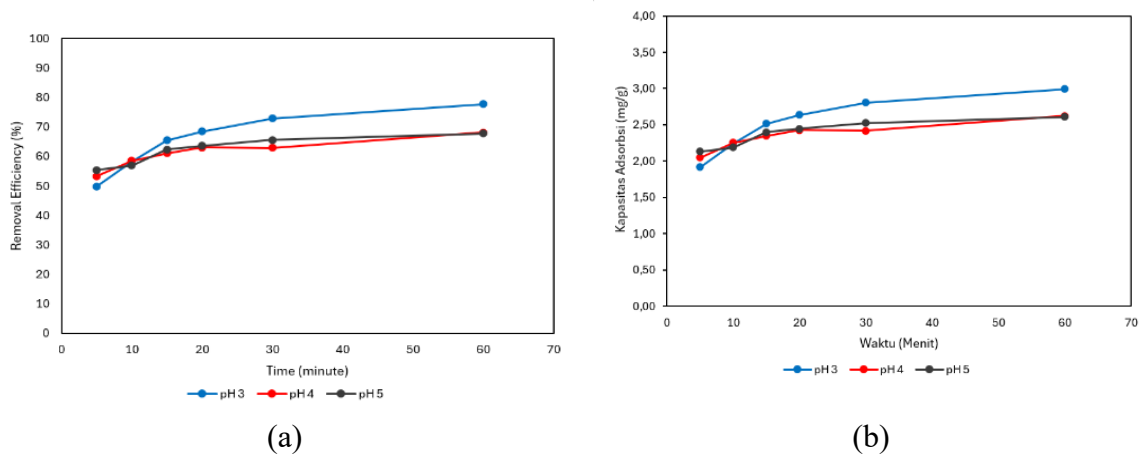
(a) (b)  
**Gambar 4.18** (a) Efisiensi Penyisihan dan (b) Kapasitas Adsorpsi Silika terhadap Enrofloxacin pada Konsentrasi 5 mg/L dengan Variasi pH dan Waktu Kontak

Proses adsorpsi dengan menggunakan adsorben silika berlangsung dengan efektif pada kondisi asam kuat (pH 3). Efisiensi seiring dengan waktu mengalami kenaikan hingga mencapai puncaknya di menit ke-60 sebesar 96,18%, dengan kapasitas maksimum sebesar 3,69 mg/g. Rendahnya rasio konsentrasi sisa (Ct/Co) yang bernilai 0,04 mengindikasikan bahwa hampir seluruh molekul ENR dalam larutan berhasil diikat oleh silika. Fase kesetimbangan berada pada menit ke-20 hingga menit ke-60, peningkatan efisiensi mulai melambat dan bergerak menuju konstan. Ketika pH dinaikkan ke pH 4 dan 5, kemampuan silika untuk mengadsorpsi ENR

menurun drastis hingga mendekati nol. Pada pH 4, efisiensi adsorpsi berkisar 0,36% hingga 6% saja. Sementara itu pada pH 5 efisiensi adsorpsi makin menurun dengan nilai E maksimal hanya 3,64% pada menit ke-60. Nilai  $C_t/C_o$  bertahan pada angka 0,96-1 yang artinya konsentrasi antibiotik di dalam larutan hampir tidak berkurang. Peningkatan pH 4 dan 5 merubah kesetimbangan muatan tersebut. Struktur muatan ENR perlahan mulai mendekati bentuk zwitterion netral mendekati nilai pKa-nya, sehingga mengakibatkan kemampuan silika untuk mengadsorpsi ENR makin melemah.

**Tabel 4.11** Hasil Adsorpsi nZVI Pada Konsentrasi 5 mg/L

| pH | Waktu | Ct   | Co | E (%) | Q (mg/g) | Ct/Co |
|----|-------|------|----|-------|----------|-------|
| 3  | 5     | 2,51 | 5  | 49,82 | 1,916    | 0,50  |
|    | 10    | 2,09 | 5  | 58,18 | 2,238    | 0,42  |
|    | 15    | 1,73 | 5  | 65,45 | 2,517    | 0,35  |
|    | 20    | 1,57 | 5  | 68,55 | 2,636    | 0,31  |
|    | 30    | 1,35 | 5  | 72,91 | 2,804    | 0,27  |
|    | 60    | 1,11 | 5  | 77,82 | 2,993    | 0,22  |
| 4  | 5     | 2,34 | 5  | 53,27 | 2,049    | 0,47  |
|    | 10    | 2,07 | 5  | 58,55 | 2,252    | 0,41  |
|    | 15    | 1,95 | 5  | 61,09 | 2,350    | 0,39  |
|    | 20    | 1,85 | 5  | 63,09 | 2,427    | 0,37  |
|    | 30    | 1,85 | 5  | 62,91 | 2,420    | 0,37  |
|    | 60    | 1,59 | 5  | 68,18 | 2,622    | 0,32  |
| 5  | 5     | 2,23 | 5  | 55,45 | 2,133    | 0,45  |
|    | 10    | 2,15 | 5  | 56,91 | 2,189    | 0,43  |
|    | 15    | 1,88 | 5  | 62,36 | 2,399    | 0,38  |
|    | 20    | 1,82 | 5  | 63,64 | 2,448    | 0,36  |
|    | 30    | 1,72 | 5  | 65,64 | 2,524    | 0,34  |
|    | 60    | 1,61 | 5  | 67,82 | 2,608    | 0,32  |

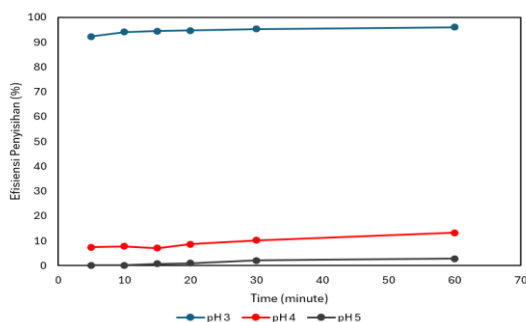


**Gambar 4.19** (a) Efisiensi Penyisihan dan (b) Kapasitas Adsorpsi nZVI terhadap Enrofloxacin pada Konsentrasi 5 mg/L dengan Variasi pH dan Waktu Kontak

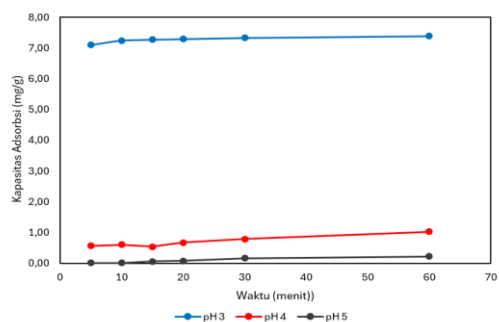
Berdasarkan Tabel 4.11 kondisi optimum diperoleh pada pH 3 dengan waktu kontak 60 menit, yang dengan efisiensi penyisihan sebesar 77,82%, dengan kapasitas adsorpsi sebesar 2,993 mg/g. sementara itu pada pH 4 dan pH 5 efisiensi maksimum masing-masing hanya mencapai 68,18% dan 67,82%. Hasil ini menunjukkan bahwa kondisi yang lebih asam yaitu pH 3 memberikan kemampuan adsorpsi lebih baik dibandingkan pH 4 dan pH 5. Sehingga pH 3 menjadi kondisi optimum pada adsorpsi dengan konsentrasi 5 mg/L.

**Tabel 4.12** Hasil Adsorpsi Silika Pada Konsentrasi 10 mg/L

| pH | Waktu | Ct   | Co | E (%) | Q (mg/g) | Ct/Co |
|----|-------|------|----|-------|----------|-------|
| 3  | 5     | 0,77 | 10 | 92,27 | 7,098    | 0,08  |
|    | 10    | 0,59 | 10 | 94,09 | 7,238    | 0,06  |
|    | 15    | 0,55 | 10 | 94,45 | 7,266    | 0,06  |
|    | 20    | 0,53 | 10 | 94,73 | 7,287    | 0,05  |
|    | 30    | 0,47 | 10 | 95,27 | 7,329    | 0,05  |
|    | 60    | 0,40 | 10 | 96,00 | 7,385    | 0,04  |
| 4  | 5     | 9,26 | 10 | 7,36  | 0,566    | 0,93  |
|    | 10    | 9,22 | 10 | 7,82  | 0,601    | 0,92  |
|    | 15    | 9,30 | 10 | 7,00  | 0,538    | 0,93  |
|    | 20    | 9,14 | 10 | 8,64  | 0,664    | 0,91  |
|    | 30    | 8,98 | 10 | 10,18 | 0,783    | 0,90  |
|    | 60    | 8,67 | 10 | 13,27 | 1,021    | 0,87  |
| 5  | 5     | 9,99 | 10 | 0,09  | 0,007    | 1,00  |
|    | 10    | 9,99 | 10 | 0,09  | 0,007    | 1,00  |
|    | 15    | 9,93 | 10 | 0,73  | 0,056    | 0,99  |
|    | 20    | 9,90 | 10 | 1,00  | 0,077    | 0,99  |
|    | 30    | 9,79 | 10 | 2,09  | 0,161    | 0,98  |
|    | 60    | 9,72 | 10 | 2,82  | 0,217    | 0,97  |



(a)



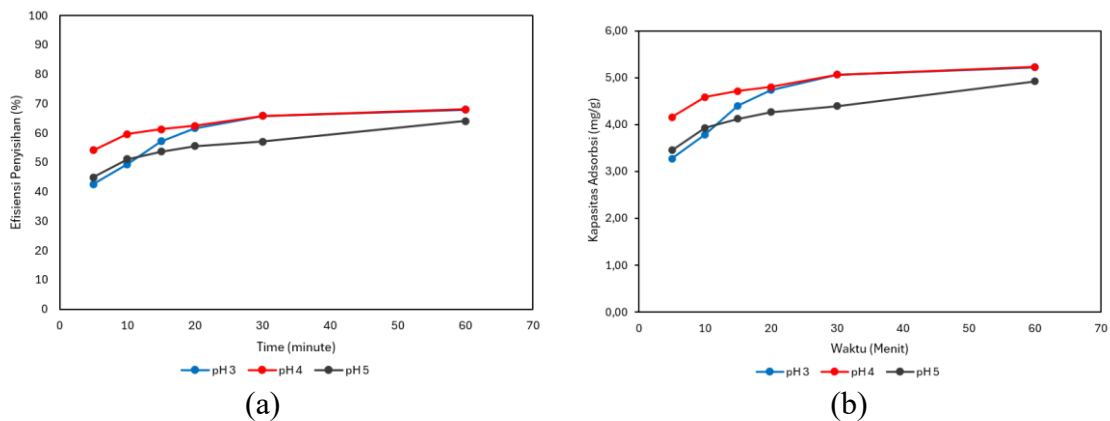
(b)

**Gambar 4.20** (a) Efisiensi Penyisihan dan (b) Kapasitas Adsorpsi Silika terhadap Enrofloxacin pada Konsentrasi 10 mg/L dengan Variasi pH dan Waktu Kontak

Seperti pada variasi konsentrasi 2 mg/L dan 5 mg/L, pada variasi konsentrasi 10 mg/L efektifitas adsorpsi maksimal pada kondisi pH 3. Silika menunjukkan peningkatan adsorpsi yang sangat tinggi seiring bertambahnya waktu dari 92% hingga mencapai 96%. Dengan kapasitas adsorpsi maksimum yang didapatkan sebesar 7,385 mg/g. rendahnya rasio Ct/Co senilai 0,04 menjelaskan bahwa penyerapan adsorben terhadap adsorbat hampir terserap. Pada pH 4 efisiensi menurun dan nilai E tertinggi hanya mencapai 13,27% pada menit ke-60 dengan kapasitas maksimal sebesar 1,021 mg/g. Pada kondisi pH 5, proses adsorpsi hampir tidak terjadi karena efisiensi penyerapan hanya mencapai 2,82% pada menit ke-60. Nilai Ct/Co berkisar hanya 0,97-1 yang mengindikasikan bahwa konsentrasi ENR di dalam larutan hampir sama dengan konsentrasi awalnya. Jika dibandingkan dengan data konsentrasi awal 5 mg/L dan 10 mg/L nilai efisiensi (E) pada pH 3 menit ke-60 efisiensinya relatif sama kuat dan kapasitas adsorpsi naik dua kali lipat. Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan konsentrasi awal memberikan dorongan gaya (*driving force*) berupa perbedaan gradien konsentrasi yang lebih tinggi antara larutan dan fase padat, sehingga lebih banyak molekul ENR untuk berpindah dan terikat pada situs aktif silika yang masih tersedia.

**Tabel 4.13** Hasil Adsorpsi nZVI Pada Konsentrasi 10 mg/L

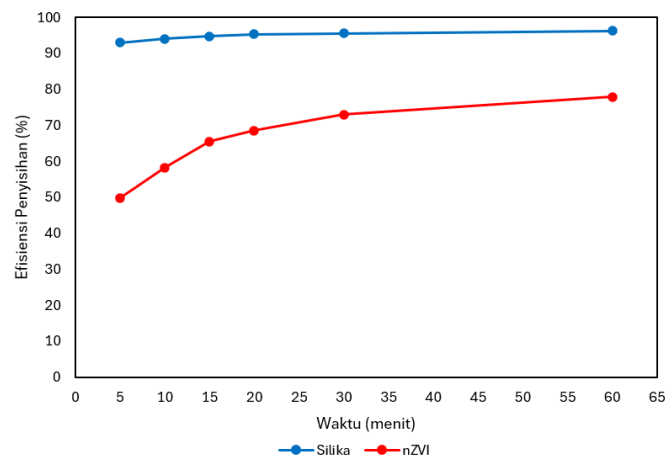
| pH | Waktu | Ct   | Co | E (%) | Q (mg/g) | Ct/Co |
|----|-------|------|----|-------|----------|-------|
| 3  | 5     | 5,75 | 10 | 42,55 | 3,273    | 0,57  |
|    | 10    | 5,07 | 10 | 49,27 | 3,790    | 0,51  |
|    | 15    | 4,28 | 10 | 57,18 | 4,399    | 0,43  |
|    | 20    | 3,85 | 10 | 61,55 | 4,734    | 0,38  |
|    | 30    | 3,42 | 10 | 65,82 | 5,063    | 0,34  |
|    | 60    | 3,21 | 10 | 67,91 | 5,224    | 0,32  |
| 4  | 5     | 4,59 | 10 | 54,09 | 4,161    | 0,46  |
|    | 10    | 4,04 | 10 | 59,64 | 4,587    | 0,40  |
|    | 15    | 3,87 | 10 | 61,27 | 4,713    | 0,39  |
|    | 20    | 3,76 | 10 | 62,36 | 4,797    | 0,38  |
|    | 30    | 3,42 | 10 | 65,82 | 5,063    | 0,34  |
|    | 60    | 3,20 | 10 | 68,00 | 5,231    | 0,32  |
| 5  | 5     | 5,51 | 10 | 44,91 | 3,455    | 0,55  |
|    | 10    | 4,89 | 10 | 51,09 | 3,930    | 0,49  |
|    | 15    | 4,64 | 10 | 53,64 | 4,126    | 0,46  |
|    | 20    | 4,45 | 10 | 55,45 | 4,266    | 0,45  |
|    | 30    | 4,29 | 10 | 57,09 | 4,392    | 0,43  |
|    | 60    | 3,60 | 10 | 64,00 | 4,923    | 0,36  |



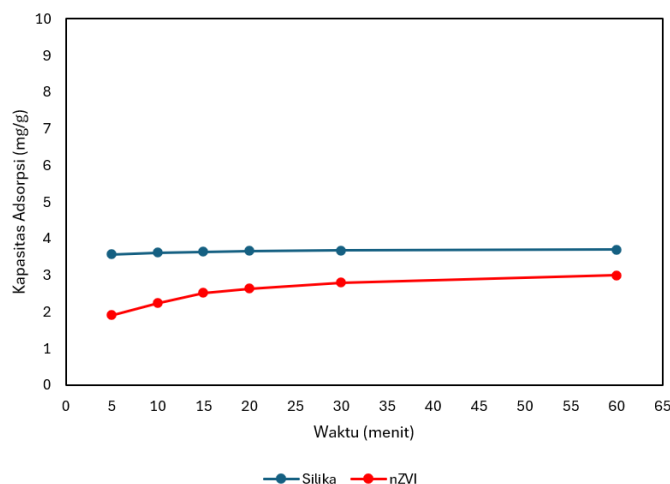
**Gambar 4.21** (a) Efisiensi Penyisihan dan (b) Kapasitas Adsorpsi nZVI terhadap Enrofloxacin pada Konsentrasi 10 mg/L dengan Variasi pH dan Waktu Kontak

Berdasarkan hasil adsorpsi ENR menggunakan adsorben nZVI didapatkan hasil pH 4 memiliki efisiensi adsorpsi tertinggi yaitu 68% dan kapasitas adsorpsi terbesar yaitu 5,231 mg/g. Hasil adsorpsi pada variasi pH 3 nilai efisiensi penyisihan didapatkan hasilnya tidak jauh beda dengan pH 4 yaitu 67,91% dan kapasitas maksimumnya yaitu 5,224 mg/g. Sementara itu pada pH 5 proses adsorpsi menghasilkan nilai efisiensi penyisihan lebih rendah diantara pH 3 dan 4 yaitu sebesar 64% dan kapasitas adsorpsi sebesar 4,923 mg/g pada menit ke-60. Peningkatan waktu kontak menyebabkan efisiensi adsorpsi dan kapasitas adsorpsi meningkat pada seluruh variasi pH. Kondisi optimum pada pH 4 menunjukkan bahwa pada pH tersebut interaksi antara gugus aktif nZVI dan molekul ENR yang dapat menempati situs aktif adsorben

Berikut merupakan hasil perbandingan dari hasil efisiensi penyisihan yang terbaik antara kedua adsorben yaitu pada konsentrasi 5 mg/L pH 3 yang dapat dilihat pada Gambar 4.22 dan 4.23.



**Gambar 4.22** Perbandingan Hasil Adsorpsi nZVI dan Silika



**Gambar 4. 23** Perbandingan Hasil Kapasitas Adsorpsi nZVI dan Silika

Penurunan kapasitas adsorpsi pada material silika seiring dengan meningkatnya pH umumnya berkaitan dengan muatan permukaan adsorben dan juga karakteristik dari silika, dimana karakteristik morfologi memperlihatkan permukaan silika berbentuk butiran kasar dan tidak beraturan, selain itu permukaan kasar meningkatkan luas area kontak antara adsorben dan adsorbat sehingga molekul enrofloxacin mudah menempel. Selain karakteristik permukaan, kondisi pH larutan juga memberikan pengaruh yang besar. Hasil pH-pzc dan sifat dari adsorbat pada larutan memberikan pengaruh yang besar selama proses adsorpsi. Pada hasil adsorpsi silika terlihat pada pH rendah (pH 3) ENR bersifat kationik dimana ENR akan bermuatan positif pada kondisi pH rendah atau asam. Kondisi larutan yang kaya ion  $H^+$  membuat permukaan adsorben terprotonasi sehingga adsorben bermuatan menjadi positif, sehingga memicu gaya tarik elektrostatis yang kuat. Sebuah molekul dengan nilai pKa yang mirip dengan pH-pzc akan menghasilkan kinerja adsorpsi yang lebih buruk pada nilai pH yang paling jauh dari titik tersebut. Oleh karena itu pada pH 3 reduksi ENR menghasilkan nilai yang paling tinggi pada semua variasi konsentrasi. ENR juga mengandung atom oksigen dan fluorida dalam strukturnya, yang dapat membentuk ikatan hidrogen dengan permukaan adsorbat. Hal ini menyebabkan pengikatan yang lebih tinggi pada antibiotik dalam kondisi asam, karena penyerapan meningkat dan terlepas dari tolakan elektrostatis (Berges *et al.*, 2021). Dari hasil adsorpsi silika didapatkan hasil yang terbaik yaitu pada konsentrasi 5 mg/L pada pH 3, dimana efisiensi penyisihannya sebesar 96,18%. Jika dibandingkan hasil penelitian dari da Silva de Assis *et al.*, (2024) efisiensi penyisihan terbaik silika didapatkan nilainya sebesar 94% dalam mereduksi antibiotik ciprofloxacin. Puncak efisiensi hingga 94% tersebut diperoleh ketika dilakukan pengujian pengaruh dosis adsorben, di mana peningkatan dosis dari 0,020 g menjadi 0,100 g meningkatkan efisiensi penyisihan secara drastis dari 69% menjadi sekitar 94%.

Tingginya hasil adsorpsi menggunakan adsorben silika berkaitan dengan hasil analisis BET yang menunjukkan bahwa material silika memiliki luas permukaan spesifik sebesar 278,721  $m^2/g$  volume pori 0,76  $cm^3/g$ , dan diameter pori rata-rata 7,317 nm yang termasuk kategori mesopori. Struktur mesopori menyediakan luas permukaan yang besar serta jumlah situs aktif yang lebih banyak sehingga molekul enrofloxacin lebih mudah berdifusi ke dalam pori dan berinteraksi dengan permukaan adsorben. Semakin besar luas permukaan adsorben, semakin banyak pula molekul adsorbat yang dapat terikat sehingga efisiensi penyisihan meningkat (Thommes *et al.*, 2015). Peran gugus fungsi tersebut semakin diperjelas oleh hasil FTIR yang menunjukkan keberadaan gugus Si-OH (silanol) dan Si-O-Si (siloksan). Gugus silanol bersifat

aktif sehingga membentuk interaksi dengan molekul enrofloxacin melalui ikatan hidrogen maupun interaksi elektrostatik. Banyaknya gugus hidroksil pada permukaan silika menyebabkan jumlah situs adsorpsi meningkat sehingga molekul enrofloxacin lebih mudah terikat pada permukaan adsorben.

Hasil adsorpsi dari material nZVI didapatkan nilai efisiensi penyisihan yang paling tinggi sebesar 77,82% pada konsentrasi 5 mg/L dengan pH 3. Hasil efisiensi penyisihan nZVI yang didapatkan tidak setinggi hasil adsorpsi pada silika. Hal ini berhubungan dengan hasil SEM material nZVI berbentuk bulat dengan permukaan tidak rata dan strukturnya yang menyerupai serpihan, sehingga tidak tersebar secara individual dan mengelompok membentuk agregat akibat sifat magnetik alami dari besi nol valensi. Walaupun nZVI memiliki reaktivitas kimia yang tinggi, agregasi fisik yang terbentuk pada SEM membatasi jumlah situs aktif yang dapat menyerap ENR. Hasil EDX mapping menunjukkan keberadaan unsur O (38,4%) dan Fe (32,4%) mengkonfirmasi keberadaan lapisan oksida besi yang menyebabkan nZVI memiliki permukaan reaktif. Gugus hidroksil Fe-OH pada permukaan nZVI menjadi situs aktif utama dalam interaksi elektrostatik dan pembentukan kompleks permukaan dengan ENR.

Nilai pH-pzc pada material besi nol valensi (nZVI) berada pada pH 7. Karena pH larutan variasi untuk adsorpsi berada di bawah nilai pH-pzc nZVI ( $\text{pH } 3, 4, 5 < 7$ ), permukaan nZVI akan mengalami protonasi berlebih oleh ion hidrogen ( $\text{H}^+$ ). Hal ini menyebabkan permukaan nZVI memiliki muatan positif. Pada kondisi asam ini, molekul ENR mengalami protonasi penuh pada struktur nitrogennya, sehingga berada dalam bentuk kationik yang bermuatan positif sehingga secara hukum fisika akan terjadi gaya tolak menolak elektrostatik antara keduanya (Archariyapanyakul *et al.*, 2017). Meskipun adsorpsi dilakukan pada variasi larutan pH rendah (pH 3-5) tidak memberikan hasil efisiensi penyisihan yang tinggi, namun kondisi asam ini secara kimiawi dapat mempercepat proses korosi dan reaksi reduksi. Pada pH rendah kelimpahan proton ( $\text{H}^+$ ) mempercepat pelarutan lapisan oksida pasif pada permukaan besi. Hal ini dapat menjaga inti besi nol valensi ( $\text{Fe}^0$ ) tetap aktif melepaskan elektron untuk mendegradasi kontaminan secara kimia (melalui ikatan molekul), walaupun adsorbat tersebut tidak menempel secara kuat di permukaan adsorben ketika proses adsorpsi (Gecgel *et al.*, 2018).

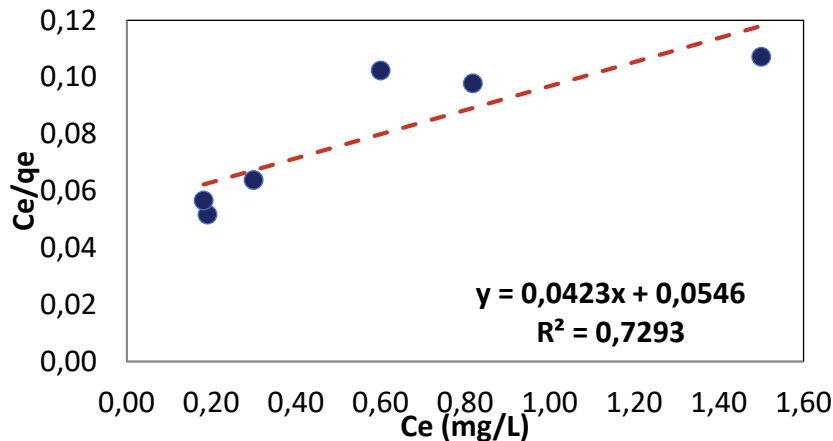
#### 4.5.2 Analisis Isotermal Adsorpsi

Analisis isoterm adsorpsi digunakan untuk memahami mekanisme interaksi antara adsorben silika ( $\text{SiO}_2$ ) dengan adsorbat dalam fase cair. Proses adsorpsi umumnya mengikuti model isoterm Langmuir dan Freundlich, di mana kedua model ini mewakili dua pendekatan mekanisme yang berbeda dalam menjelaskan fenomena adsorpsi pada antarmuka padat-cair. Isotherm memiliki peran penting dalam menentukan mekanisme adsorpsi. Permukaan dapat dianggap sebagai lapisan tunggal atau multi-lapisan. Penentuan isotherm adsorpsi dibuat berdasarkan data adsorpsi pada variasi jumlah berat adsorben silika yang digunakan. Penentuan isotherm adsorpsi dibuat berdasarkan data adsorpsi silika pada variasi dosis adsorben (0,05–0,30 g) dengan konsentrasi awal ( $C_0$ ) tetap sebesar 5 mg/L. Model isotherm Langmuir dijelaskan melalui persamaan 2.3, kemudian hasil perhitungan nilai  $C_e/q_e$  diplotkan terhadap  $C_e$  untuk memperoleh persamaan garis linear. Contoh perhitungan pada dosis adsorben 0,05 g adalah sebagai berikut.

- $C_e = 1,5 \text{ mg/L}$
- $q_e = 14 \text{ mg/g}$

- $C_e/q_e = \frac{1,5}{14} = 0,107$

Hasil plot  $C_e/q_e$  terhadap  $C_e$  untuk seluruh titik data ditampilkan pada Gambar 4.24 sebagai berikut.



**Gambar 4. 24** Isotermal Langmuir Silika

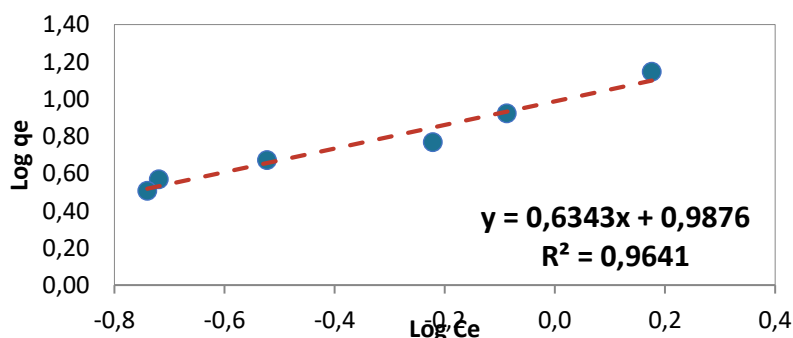
Dari grafik tersebut diperoleh persamaan garis linear  $y = 0,0423x + 0,0546$  dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,7293. Dari persamaan tersebut, nilai  $q_{max}$  dan  $K_L$  dihitung sebagai berikut:

- $q_{max} = \frac{1}{\text{slope}} = \frac{1}{0,0423} = 23,637 \text{ mg/g}$
- $K_L = \frac{\text{slope}}{\text{intercept}} = \frac{0,0423}{0,0546} = 0,775 \text{ L/mg}$

Kemudian, model isoterm Freundlich dijelaskan melalui persamaan 2.4 yang mengindikasikan bahwa hubungan antara konsentrasi kesetimbangan ( $C_e$ ) dan kapasitas adsorpsi pada kesetimbangan ( $q_e$ ) dapat digambarkan dalam grafik. sumbu x merepresentasikan  $\log(C_e)$ , sedangkan sumbu y menunjukkan  $\log(q_e)$ . Contoh perhitungan pada dosis adsorben 0,05 g adalah sebagai berikut.

- $\log(C_e) = \log(1,5) = 0,176$
- $\log(q_e) = \log(14) = 1,146$

Hasil plot  $\log(q_e)$  terhadap  $\log(C_e)$  untuk seluruh titik data disajikan pada Gambar 4.25



**Gambar 4. 25** Isotermal Freundlich Silika

Dari grafik tersebut diperoleh persamaan garis linear  $y = 0,6343x + 0,9876$  dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,9641. Dari persamaan tersebut, nilai  $n$  dan  $K_f$  dihitung sebagai berikut:

- $n = \frac{1}{\text{slope}} = \frac{1}{0,6343} = 1,577$
- $K_f = 10^{\text{intercept}} = 10^{0,9876} = 9,719 \text{ L/mg}$

Berdasarkan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ), model Freundlich ( $R^2 = 0,9641$ ) menunjukkan kesesuaian yang jauh lebih baik dibandingkan model Langmuir ( $R^2 = 0,7293$ ) dalam menggambarkan data kesetimbangan adsorpsi silika. Nilai  $n$  sebesar 1,577 mengindikasikan bahwa permukaan bersifat heterogen hal ini sesuai dengan teori untuk nilai ( $0 < 1/n < 1$ ) mengindikasikan bahwa adsorpsi terjadi pada permukaan silika yang heterogen, dengan energi ikatan yang bervariasi antar situs aktif, serta berpotensi berlangsung secara multilayer. Hal ini sejalan dengan karakteristik permukaan silika yang memiliki gugus silanol (Si-OH) dengan reaktivitas yang tidak seragam di berbagai posisi permukaan partikel sesuai dengan hasil morfologi SEM dan uji FTIR.

#### 4.5.3 Analisis Kinetika Adsorpsi

Pada penelitian ini, data hasil adsorpsi silika pada variasi waktu kontak dianalisis dengan menggunakan dua model kinetika yang paling umum digunakan yaitu pseudo first order (PFO) dan pseudo second order (PSO) untuk menyesuaikan data percobaan dengan nilai prediksi model yang dinyatakan dalam koefisien korelasi ( $R^2$ ). Pemodelan kinetika adsorpsi PFO menggunakan pendekatan Lagergren. Dianalisis dengan memplot grafik antara  $\ln(Q_e - Q_t)$  sebagai sumbu y terhadap waktu kontak ( $t$ ) dalam satuan menit pada sumbu x. Hubungan linier ini digunakan untuk menentukan konstanta laju adsorpsi orde satu semu ( $k_1$ ) serta nilai kapasitas adsorpsi teoritis pada kesetimbangan ( $Q_e$ ) adsorben silika. Sementara itu, pemodelan kinetika orde dua semu dianalisis dengan memplot  $t/Q_t$  sebagai sumbu y terhadap waktu kontak ( $t$ ) sebagai sumbu x. Nilai tersebut digunakan untuk mengevaluasi kecepatan dan mekanisme proses adsorpsi yang berlangsung.

Perhitungan dilakukan berdasarkan data kapasitas adsorpsi ( $Q_t$ ) pada berbagai waktu kontak (10–90 menit) dengan konsentrasi awal ( $C_0$ ) sebesar 5 mg/L pada pH 3. Dari hasil analisis, diketahui bahwa adsorben silika mencapai kesetimbangan pada waktu kontak 90 menit, dengan kapasitas adsorpsi kesetimbangan ( $Q_e$ ) sebesar 3,636 mg/g. Contoh perhitungan model kinetika orde satu semu adalah sebagai berikut.

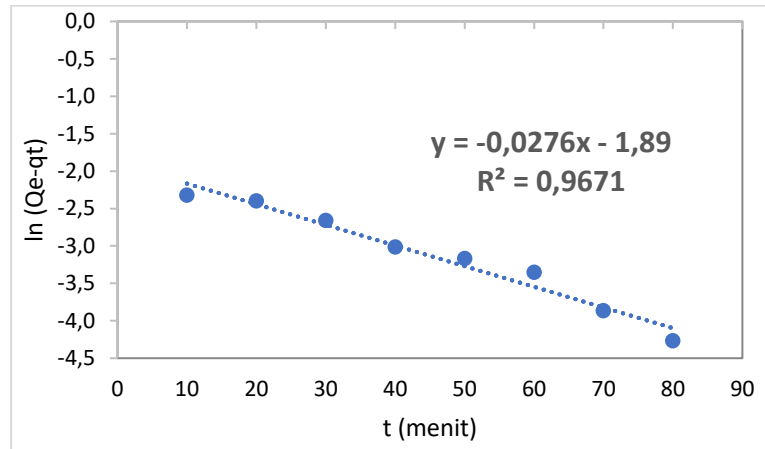
- Kapasitas adsorpsi silika pada kesetimbangan ( $Q_e$ ) = 3,636 mg/g
- Kapasitas adsorpsi pada waktu 10 menit ( $Q_t$ ) = 3,538 mg/g
- $\ln(Q_e - Q_t) = \ln(3,636 - 3,538)$   
 $= \ln(0,098)$   
 $= -2,324$

Kemudian, diplotkan waktu kontak sebagai sumbu x dengan data  $\ln(Q_e - Q_t)$  sebagai sumbu y menjadi sebuah grafik. Hasil visualisasi dari pemodelan kinetika PFO ditampilkan pada Gambar 4.26. Sehingga diperoleh persamaan yang selanjutnya dihitung menggunakan Persamaan 2.1. Perhitungan dengan data sebagai berikut.

- Silika  
 $K_1 = 0,0276 \text{ menit}^{-1}$

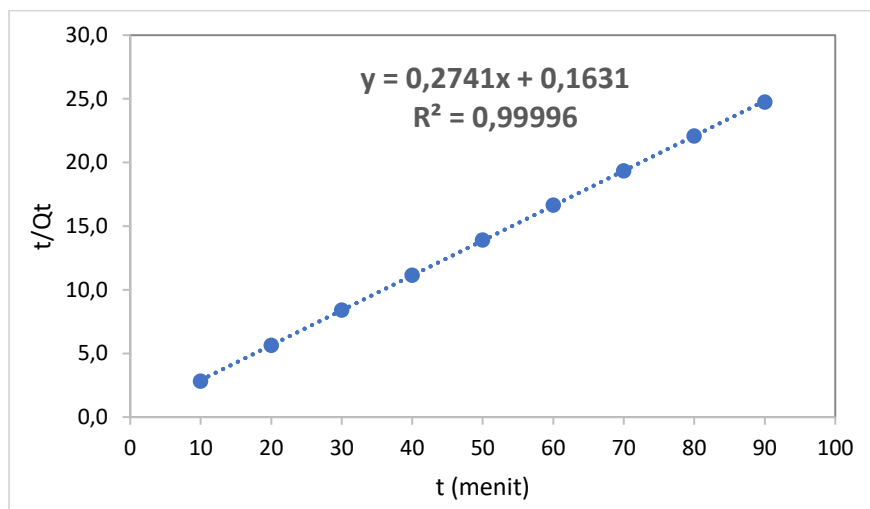
$$\ln(Q_e) = -1,89$$

$$Q_e \text{ hitung} = 0,151 \text{ mg/g}$$



**Gambar 4. 26** Pseudo First Order Silika

Nilai  $R^2$  sebesar 0,9671 menunjukkan tingkat kelinieran yang cukup tinggi antara data dan garis regresi, yang mengindikasikan bahwa model orde satu semu secara statistik merepresentasikan pola data pada rentang waktu tersebut. Hasil perhitungan didapatkan nilai  $Q_e$  hitung (0,151 mg/g) lebih kecil dibandingkan dengan nilai  $Q_e$  hasil pengukuran eksperimen (3,636 mg/g). Perbedaan nilai  $Q_e$  yang cukup jauh ini menunjukkan bahwa meskipun data menunjukkan kelinieran yang baik secara statistik, model orde satu semu belum mampu merepresentasikan mekanisme adsorpsi silika secara akurat.



**Gambar 4. 27** Pseudo Second Order Silika

Pemodelan kinetika adsorpsi PSO dilakukan dengan memplot grafik antara waktu kontak ( $t$ ) sebagai sumbu x dan  $t/Q_t$  sebagai sumbu y. Perhitungan serupa dilakukan untuk model kinetika orde dua semu, dengan contoh perhitungan pada waktu kontak 10 menit sebagai berikut.

- Kapasitas adsorpsi silika pada waktu  $t$  ( $Q_t$ ) = 3,538 mg/g

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{10}{3,538} = 2,826 \text{ menit.g/mg}$$

Hasil plot  $t/Q_t$  terhadap waktu kontak untuk seluruh titik data (10–90 menit) ditampilkan pada Gambar 4.23. Sehingga diperoleh persamaan garis linier  $y = 0,2741x + 0,1631$  dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,99996. Dari persamaan tersebut diperoleh nilai  $k_2$  sebesar 0,4604 g/mg·menit dan  $Q_e$  hitung sebesar 3,649 mg/g.

Perbandingan kedua model menunjukkan bahwa nilai  $R^2$  model orde dua semu jauh lebih tinggi dibandingkan model PFO. Selain itu, nilai  $Q_e$  hitung dari model PSO (3,649 mg/g) sangat mendekati nilai  $Q_e$  eksperimen (3,636 mg/g), sedangkan  $Q_e$  hitung dari model PFO (0,151 mg/g) nilainya jauh dari nilai eksperimen. Berdasarkan kedua indikator tersebut, dapat disimpulkan bahwa proses adsorpsi silika terhadap adsorbat mengikuti model kinetika PSO, yang mengindikasikan bahwa mekanisme adsorpsi didominasi oleh kemisorpsi (*chemisorption*). Mekanisme kemisorpsi yaitu melibatkan interaksi kimia antara situs aktif pada permukaan silika dengan adsorbat, bukan sekadar interaksi fisik sederhana. Ikatan kimia yang terjadi yaitu adanya interaksi antara gugus aktif pada permukaan adsorben dan molekul adsorbat. Gugus silanol (Si–OH) pada permukaan silika berperan sebagai situs aktif yang dapat berinteraksi dengan gugus karbonil (C=O), gugus karboksilat (–COOH/–COO<sup>–</sup>), serta gugus amina pada molekul enrofloxacin melalui pembentukan ikatan hidrogen. Selain itu, pada pH optimum (pH 3), permukaan silika yang mulai bermuatan negatif (Si–O<sup>–</sup>) dapat berinteraksi secara elektrostatis dengan gugus piperazin enrofloxacin yang masih terprotonasi (–NH<sub>2</sub><sup>+</sup>). Temuan ini sejalan dengan penelitian Assis *et al* (2024) yang menyebutkan bahwa adsorpsi antibiotik golongan fluoroquinolone pada material silika lebih sesuai dengan model pseudo second order karena dikendalikan oleh interaksi elektrostatis dan ikatan hidrogen antara gugus silanol pada permukaan silika dan gugus fungsi antibiotik.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan sementara dari penelitian ini Adalah sebagai berikut:

1. Material  $\text{SiO}_2$  dari sintesis limbah sandblasting menghasilkan warna material putih berbentuk serbuk, nZVI berwarna coklat tua, sedangkan komposit nZVI- $\text{SiO}_2$  memiliki warna hitam pekat. Hasil uji karakteristik dilakukan pada material  $\text{SiO}_2$  dimana hasil SEM  $\text{SiO}_2$  memiliki morfologi berupa butiran kasar dan terbentuk gumpalan dengan ukuran rata-rata mencapai  $47,36 \mu\text{m}$  ( $47.366 \text{ nm}$ ). Pada material silika, luas permukaan spesifik  $278,721 \text{ m}^2/\text{g}$  dan diameter pori  $0,76 \text{ cm}^3/\text{g}$ . Morfologi nZVI berbentuk bulat dengan permukaan tidak rata dan juga memiliki permukaan partikel yang menyerupai serpih, dimana ukuran rata-rata distribusi partikelnya yaitu  $1629 \text{ nm}$ . Hasil morfologi dari komposit nZVI- $\text{SiO}_2$  permukaan tampak lebih kasar dan heterogen, ukuran rata-rata distribusi partikelnya yaitu  $10.946 \text{ nm}$ .
2. Material Silika ( $\text{SiO}_2$ ) memiliki *removal efficiency* optimal pada ENR dengan konsentrasi awal  $5 \text{ mg/L}$  pH 3 sebesar  $96,18\%$ . Pada setiap konsentrasi nilai *removal efficiency* yang paling tinggi berada pada pH 3 dan pada menit ke-60. Uji pH-pzc pada silika didapatkan sebesar pH 2. pH ini berpengaruh bersifat positif atau negatif ketika pada reaksi adsorpsi yang terjadi. Plot isothermal adsorpsi ENR pada material silika mengikuti model isothermal Freundlich yang menunjukkan bahwa adsorpsi berlangsung pada permukaan heterogen dengan kemungkinan terbentuknya lapisan multilayer. Kinetika adsorpsi pada material silika mengikuti model pseudo second order, yang mengindikasikan bahwa proses adsorpsi dikendalikan oleh mekanisme kimia (*chemisorption*). Sedangkan material nZVI memiliki *removal efficiency* optimal pada konsentrasi  $5 \text{ mg/L}$  pH 3 didapatkan hasilnya sebesar  $77,82\%$ .

#### 5.2 Saran

Saran dalam penelitian ini adalah dilakukan penelitian lanjutan untuk memastikan pH yang optimal untuk melihat efisiensi penyisihan ENR yang baik. Perlu dilakukan eksplorasi variasi takaran atau rasio yang lebih luas pada pembuatan komposit nZVI- $\text{SiO}_2$ . Hal ini penting untuk menemukan komposisi yang dapat mencegah aglomerasi partikel besi dan juga memastikan agar material tidak terjadi oksidasi serta diperlukan adanya penggunaan alat oven vacum untuk meminimalisir terjadinya oksidasi saat proses pembuatan sintesis nZVI dan komposit nZVI- $\text{SiO}_2$ .

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR PUSTAKA

- Ambros, L. A., Kreil, V., de Lucas Burneo, J. J., Tinti, M. G., San Andrés Larrea, M. I., & Lorenzutti, A. M. (2025). Pharmacokinetic and Pharmacodynamic Modeling of Enrofloxacin and Its Metabolite Ciprofloxacin in Pregnant Goats. *Veterinary Sciences*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/vetsci12060588>
- Anggriawan, A., Yanggi Atwanda, M., Lubis, N., & Fathoni, an. (2019). Kemampuan Adsorpsi Logam Berat Cu Dengan Menggunakan Adsorben Kulit Jagung (Zea Mays). In *Jurnal Chemurgy* (Vol. 03, Number 2).
- Anugrahadi Habibie, I., & Ulfa, M. (2023). *Studi Modifikasi Silika Abu Bonggol Jagung Menjadi Nanopartikel Silika Menggunakan Metode Stober*.
- Archariyapanyakul, P., Pangkumhang, B., Khamdahsag, P., & Tanboonchuy, V. (2017). Synthesis of Silica-supported Nanoiron for Cr(VI) Removal: Application of Box-Behnken Statistical Design (BBD). *Sains Malaysiana*, 46(4), 655–665. <https://doi.org/10.17576/jsm-2017-4604-19>
- Ariyani, M., Jansen, L. J. M., Balzer-Rutgers, P., Hofstra, N., van Oel, P., & van de Schans, M. G. M. (2024). Antibiotic residues in the cirata reservoir, Indonesia and their effect on ecology and the selection for antibiotic-resistant bacteria. *Environmental Research*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119992>
- Arshadi, M., Soleymanzadeh, M., Salvacion, J. W. L., & SalimiVahid, F. (2014). Nanoscale Zero-Valent Iron (NZVI) supported on sineguelas waste for Pb(II) removal from aqueous solution: Kinetics, thermodynamic and mechanism. *Journal of Colloid and Interface Science*, 426, 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.04.014>
- Ayawei, N., Ebelegi, A. N., & Wankasi, D. (2017). Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms. In *Journal of Chemistry* (Vol. 2017). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2017/3039817>
- Berges, J., Moles, S., Ormad, M. P., Mosteo, R., & Gómez, J. (2021a). Antibiotics removal from Aquatic Environments: Adsorption of Enrofloxacin, Frimethoprim, Sulfadiazine, and Amoxicillin on Vegetal Powdered Activated Carbon. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 8442–8452. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10972-0>
- Berges, J., Moles, S., Ormad, M. P., Mosteo, R., & Gómez, J. (2021b). Antibiotics removal from aquatic environments: adsorption of enrofloxacin, trimethoprim, sulfadiazine, and amoxicillin on vegetal powdered activated carbon. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 8442–8452. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10972-0>
- Cho, G. S., Lee, D. H., Lim, H. M., Lee, S. H., Kim, C., & Kim, D. S. (2014). Characterization of surface charge and zeta potential of colloidal silica prepared by various methods. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 31(11), 2088–2093. <https://doi.org/10.1007/s11814-014-0112-5>

- da Silva de Assis, D. A., dos Santos, E. G., & Eiras, D. (2024). Efficient and reusable mesoporous silica structures for ciprofloxacin removal from water media. *Journal of Water Process Engineering*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105144>
- Dada, A. O., Adekola, F. A., Odebunmi, E. O., Dada, F. E., Bello, O. S., & Ogunlaja, A. S. (2020). Bottom-up approach synthesis of core-shell nanoscale zerovalent iron (CS-nZVI): Physicochemical and spectroscopic characterization with Cu(II) ions adsorption application. *MethodsX*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100976>
- Dai, Y., Peng, J. J., Zhang, T. Y., Xie, X. P., Luo, S. S., Liu, W. C., & Ma, Y. (2023). Effects of antibiotics (enrofloxacin) on microbial community of water and sediment in an aquatic ecological model. *Frontiers in Veterinary Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1151988>
- Dassharma, D., Samanta, S., Dharun Nithish Kumar, S., & Halder, G. (2020). A mechanistic insight into enrofloxacin sorptive affinity of chemically activated carbon engineered from green coconut shell. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104140>
- Dyah Pertiwi, R., Djajadisastra Abdul Mutalib, J., Pujiyanto, A., Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka-Badan Tenaga Nuklir Nasional, P., & Selatan, T. (2017). Pembuatan, Karakterisasi dan Uji In Vitro Nanopartikel Emas Berbasis Konjugat Gom Arab-Vinkristin (Preparation of Gold Nanoparticles with Based on Conjugated Gum Arabic Vincristine and Evaluation of Their In Vitro Characteristics). *JURNAL ILMU KEFARMASIAN INDONESIA*, 16(1), 6–11.
- Ellerbrock, R., Stein, M., & Schaller, J. (2022). Comparing amorphous silica, short-range-ordered silicates and silicic acid species by FTIR. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15882-4>
- Fairuzi, I. I., Yuniarto, A., Nurhayati, E., & Purnomo, A. (2025). Reduction of Ciprofloxacin Concentration in Wastewater Treatment Plant Effluent Using nZVI-MXene. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 15(6). <https://doi.org/10.33263/BRIAC156.086>
- Fakioğlu, M., & Kalpaklı, Y. (2022). Mechanism and behavior of caffeine sorption: affecting factors. In *RSC Advances* (Vol. 12, Number 41, pp. 26504–26513). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d2ra04501j>
- Fathaddin, M. T. (2021). Penerapan Model Isotermal untuk Adsorpsi Statik Xanthan pada Batuan Pasir untuk Berbagai Salinitas. In *Jurnal Offshore* (Vol. 5, Number 1).
- Gecgel, C., Simsek, U. B., & Turabik, M. (2018). Degradation of imidacloprid in aqueous solutions by zero valent iron nanoparticles in the nitrogen medium. *Desalination and Water Treatment*, 114, 341–355. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22355>
- Ghaffarzadeh, M., Rasouli Khorjistan, R., Afradi, A., Bandehpey, A., & Behbudi, G. (2024). Recent advances in synthesis, properties, and applications of nano-zero valent iron: A promising material for environmental remediation. *Synthesis and Sintering*, 4(4), 226–240. <https://doi.org/10.53063/synsint.2024.44242>

- Guan, Z., Wan, J., Ma, Y., Wang, Y., & Shu, Y. (2015a). Application of novel amino-functionalized NZVI@SiO<sub>2</sub> nanoparticles to enhance anaerobic granular sludge removal of 2,4,6-trichlorophenol. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/548961>
- Guan, Z., Wan, J., Ma, Y., Wang, Y., & Shu, Y. (2015b). Application of novel amino-functionalized NZVI@SiO<sub>2</sub> nanoparticles to enhance anaerobic granular sludge removal of 2,4,6-trichlorophenol. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/548961>
- Hardianti, F. S., & Octaviannus, S. (2021). Kinerja Aktivasi dan Impregnasi Fly Ash sebagai Adsorben Fenol Performance of Activation and Impregnation of Fly Ash as Adsorbent Fenol. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 10(2), 70–76. <https://talenta.usu.ac.id/jtk>
- Hardyanti, S. I., Nurani, I., HP, D. S. H., Apriliani, E., & Wibowo, E. A. P. (2017). Pemanfaatan Silika (SiO<sub>2</sub>) dan Bentonit sebagai Adsorben Logam Berat Fe pada Limbah Batik. *JURNAL SAINS TERAPAN*, 3(2), 37–41.
- Hartanto, D. A., Yuwita, E., & Faila, R. N. (2023). *Karakterisasi Gugus Fungsi Pada Karbon Aktif Kulit Jagung Menggunakan Uji Fourier Transform Infrared Sebagai Bahan Pembuatan Adsorben* (Vol. 4, Number 1).
- Hastuti, A., Fulazzaky, M. A., Yuniarto, A., Iznillillah, W., Nandiyanto, A. B. D., & Fiandini, M. (2026). Isotherm Behavior and Mass Transfer Kinetics of Curcumin Adsorption onto Granular Jengkol Peel Waste Biochar. *Langmuir*. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5c05788>
- Hendrawan, A., & Aprilian, R. (2020). *Sandblasting Pada Kapal MV. Berlian Indah* (Vol. 4, Number 2).
- Himawana, N. A., Darmokoesoemo, H., Adiarto, T., Prasetya, A. B., & Ali, B. T. I. (2022). *Pemanfaatan Nanokitosan Sebagai Adsorben Merkuri (Hg) pada Limbah Pengolahan Bijih Emas* (Vol. 19, Number 2).
- Himaya, S. M., Anggorowati, D. A., & Rahman, N. A. (2025). *Modifikasi Limbah Pasir Silika PT. DPL Dengan Gugus Amine Menggunakan Metode In Situ Sebagai Material Adsorben CO<sub>2</sub>*.
- Huang, J., Zhang, J., Klümper, U., Guo, J., Berendonk, T. U., Honda, R., Liang, H., Lin, L., Li, X., & Li, B. (2026). Combined exposure of enrofloxacin and disinfection byproducts under environmentally relevant concentrations enhances antibiotic resistance risks in livestock wastewater. *Water Research*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.125189>
- Hubbe, M. A., Azizian, S., & Douven, S. (2019). Implications of Apparent Pseudo-Second-Order Adsorption Kinetics onto Cellulosic Materials: A Review. *Bioresources*, 14(2), 7582–7626.

- Ibnu Hajar, E. W., Sitorus, R. S., Mulianingtias, N., & Welan, F. J. (2018). Efektivitas Adsorpsi Logam  $Pb^{2+}$  Dan  $Cd^{2+}$  Menggunakan Media Adsorben Cangkang Telur Ayam. *Konversi*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.20527/k.v5i1.4771>
- Ibrahim, H. M., Awad, M., Al-farraj, A. S., & Al-turki, A. M. (2020). Stability and dynamic aggregation of bare and stabilized zero-valent iron nanoparticles under variable solution chemistry. *Nanomaterials*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/nano10020192>
- Ikhsan, J., Sulastri, S., & Priyambodo, E. (2015). *Pengaruh pH Pada Adsorpsi Kation Unsur Hara  $Ca^{2+}$  Dan  $K^{+}$  Oleh Silika Dari Lumpur Lapindo*.
- Janjhi, F. A., Ihsanullah, I., Bilal, M., Castro-Muñoz, R., Boczkaj, G., & Gallucci, F. (2023). MXene-based materials for removal of antibiotics and heavy metals from wastewater- a review. In *Water Resources and Industry* (Vol. 29). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2023.100202>
- Kagalkar, A., Dharaskar, S., Chaudhari, N., Vakharia, V., & Karri, R. R. (2025). Enhanced metal ion adsorption using ZnO-MXene nanocomposites with machine learning-based performance prediction. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00324-8>
- Krawczyk, K., Waclawek, S., Silvestri, D., Padil, V. V. T., Řezanka, M., Černík, M., & Jaroniec, M. (2021). Surface modification of zero-valent iron nanoparticles with  $\beta$ -cyclodextrin for 4-nitrophenol conversion. *Journal of Colloid and Interface Science*, 586, 655–662. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.10.135>
- Layang, S., Suprayogi, T., Wiatno, Meilawaty, O., Sihombing, R. J., & Ganesa, F. P. (2025). *Pemanfaatan Limbah Pasir Sandblasting Sebagai Material Perkerasan Kaku*. 10 (2), 1421–1431.
- Lin, M., Wu, J., Wu, Y., & Chen, Z. (2026). La-doped ZVI-Mn catalysts for efficient self-Fenton degradation of enrofloxacin in wastewater. *Journal of Rare Earths*. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2026.01.023>
- Mathai, T., Pal, T., Prakash, N., & Mukherji, S. (2023). Portable biosensor for the detection of Enrofloxacin and Ciprofloxacin antibiotic residues in food, body fluids, environmental and wastewater samples. *Biosensors and Bioelectronics*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2023.115478>
- Meriatna, Maulinda, L., Khalil, M., & Zulmiardi. (2015). Pengaruh Temperatur Pengeringan Dan Konsentrasi Asam Sitrat Pada Pembuatan Silika Gel Dari Sekam Padi. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 78–88. [http://ft.unimal.ac.id/teknik\\_kimia/jurnal](http://ft.unimal.ac.id/teknik_kimia/jurnal)
- Mhemeed, A. H. (2018). A General Overview on the Adsorption \*Address for Correspondence. In *Indian Journal of Natural Sciences* [www.tnsroindia.org.in](http://www.tnsroindia.org.in) ©IJONS (Vol. 9). [www.tnsroindia.org.in](http://www.tnsroindia.org.in)

- Milonjić, S. K., Čerović, L. S., Čokeša, D. M., & Zec, S. (2007). The influence of cationic impurities in silica on its crystallization and point of zero charge. *Journal of Colloid and Interface Science*, 309(1), 155–159. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.12.033>
- Namakka, M., Rahman, M. R., Mohamad Bin Said, K. A., Kuok, K. K., Md Yusof, F. A., Al-Saleem, M. S. M., Al-Humaidi, J. Y., & Rahman, M. M. (2024a). Unveiling the synergistic effect of an nZVI-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> nanocomposite for the remediation of dye contaminated wastewater. *Materials Advances*, 5(23), 9292–9313. <https://doi.org/10.1039/d4ma00853g>
- Namakka, M., Rahman, M. R., Mohamad Bin Said, K. A., Kuok, K. K., Md Yusof, F. A., Al-Saleem, M. S. M., Al-Humaidi, J. Y., & Rahman, M. M. (2024b). Unveiling the synergistic effect of an nZVI-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> nanocomposite for the remediation of dye contaminated wastewater. *Materials Advances*, 5(23), 9292–9313. <https://doi.org/10.1039/d4ma00853g>
- Nayak, A., Bhushan, B., & Kotnala, S. (2023). Fundamentals and mechanism of adsorption. In *Sustainable Remediation Technologies for Emerging Pollutants in Aqueous Environment* (pp. 29–62). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18618-9.00002-4>
- Nindra, D. L. P., Setiawan, F., & Wicaksono, D. (2023). Analisis Uji EDX Pada Material Berpenguat Karbon Kevlar Dengan Metode Vacuum Infusio dan Vacuum Bagging. *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, 9(2), 306–313. <https://doi.org/10.56521/teknika.v9i2.981>
- Pei, L. L., Yang, W. Z., Fu, J. Y., Liu, M. X., Zhang, T. T., Li, D. B., Huang, R. Y., Zhang, L., Peng, G. N., Shu, G., Yuan, Z. X., Lin, J. C., Zhang, W., Zhong, Z. J., Zhao, L., & Fu, H. L. (2020). Synthesis, characterization, and pharmacodynamics study of enrofloxacin mesylate. *Drug Design, Development and Therapy*, 14, 715–730. <https://doi.org/10.2147/DDDT.S239307>
- Polveiro, R. C., Vidigal, P. M. P., Mendes, T. A. de O., Yamatogi, R. S., Lima, M. C., & Moreira, M. A. S. (2020). Effects of enrofloxacin treatment on the bacterial microbiota of milk from goats with persistent mastitis. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61407-2>
- Pote, L. L., Nadut, A., & Latumakulita, G. (2024). Pengaruh Pelarut terhadap Struktur Nanopartikel Silika dari Limbah Batu Akik. *Jurnal Sains Dan Edukasi Sains*, 7(2), 118–127. <https://doi.org/10.24246/juses.v7i2p118-127>
- Rachman, R. A., Wildan, M. W., & Fitriani, F. (2024). Sintesis dan Karakterisasi Nanosilika dari Limbah Silica Scaling PLTP Dieng Melalui Metode Alkali Fusion NaOH. *Journal of Mechanical Engineering*, 1(1), 91–99. <https://doi.org/10.47134/jme.v1i1.2194>
- Ramadhan, D. E., Ansori, M. I. R., Maulana, M. R., Putri, M. M., Anisa, A., Juliansyah, R., Juliani, R. R., Zahra, G. R., Anjani, R. D., Tama, M. L. H., Maula, A., Fauziah, S. S., Djunaedi, M. E. H., Nurrafa, N. W., & Kurniawinata, M. I. (2025). Uji Efektivitas Antibiotik Cyprofloxacin, Enrofloxacin, Oxytetracycline untuk

- Menghambat Bakteri Patogen *Aeromonas hydrophila* secara In Vitro dan In Vivo. *JURNAL MEGAPTERA*, 4(1), 33. <https://doi.org/10.15578/jmtr.v4i1.15149>
- Raza Ul Mustafa, M., Khurshid, H., & Isa, M. H. (2024). Nanoscale zero-valent iron (NZVI) intercalated MXene (Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>) for removal of polycyclic aromatic hydrocarbons in wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112149>
- Rezasyah Alifiadi, & Agus Slamet. (2022). Utilization of Sandblasting Waste as an Alternative Material for Paving Blocks. *Jurnal Multidisiplin Madani*, 2(12), 4399–4407. <https://doi.org/10.55927/mudima.v2i12.1911>
- Rohana, E., & Rizqy Prabhata, W. (2023). *Analisis Residu Enrofloksasin Dalam Daging dan Telur Ayam*.
- Shang, K., Kim, J. H., Park, J. Y., Choi, Y. R., Kim, S. W., Cha, S. Y., Jang, H. K., Wei, B., & Kang, M. (2023). Comparative Studies of Antimicrobial Resistance in *Escherichia coli*, *Salmonella*, and *Campylobacter* Isolates from Broiler Chickens with and without Use of Enrofloxacin. *Foods*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/foods12112239>
- Simatupang, L., Devy, ;, Oktavia, P., & Doloksaribu, ; Maryati. (2017). Adsorpsi logam berat Pb(II) oleh adsorben berbasis silika dari abu vulkanik gunung Sinabung The adsorption of heavy metal Pb(II) by silica based adsorbent from volcanic ash of mount Sinabung. *Jurnal Pendidikan Kimia*, 9(2), 330–335. <https://doi.org/10.24114/jpkim.v9i2.7682>
- Sudiarta, I. W., Diantariani, N. P., & Suarya, P. (2013). Modifikasi Silika Gel Dari Abu Sekam Padi Dengan Ligan Difenilkarbazon. *JURNAL KIMIA*, 7 (1), 57–63.
- Syhabardia, Fajar, B. T. K., Winoto, S. H., Suryo, M. T. S. K., & Abdurrachiim, L. (2019). Study of Desiccant Rice Husk Ash for Air Conditioning System. *Journal of Physics: Conference Series*, 1373(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1373/1/012024>
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- Trouchon, T., & Lefebvre, S. (2016). A Review of Enrofloxacin for Veterinary Use. *Open Journal of Veterinary Medicine*, 06(02), 40–58. <https://doi.org/10.4236/ojvm.2016.62006>
- Wang, J., & Guo, X. (2020). Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method. In *Chemosphere* (Vol. 258). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127279>
- Wardiyati, S., Fisli, A., & Yusuf, S. (2013). *Sintesis dan Karakterisasi Nano Zero Valent Iron (nZVI) Dengan Metode Presipitasi*.

- Waziz, W., Riko Aulia, R., & Fajar, F. (2024). Sintesis dan Karakterisasi Nanosilika dari Limbah Silica Scaling PLTP Dieng Melalui Metode Alkali Fusion NaOH. *Journal of Mechanical Engineering*, 1(1), 91–99. <https://doi.org/10.47134/jme.v1i1.2194>
- Widiyanti, P. M., Sudarwanto, M. B., Sudarnika, E., & Widiastuti, R. (2019). The Use of Enrofloxacin Antibiotic as a Veterinary Drug and Its Residual Hazards on Public Health. *Indonesian Bulletin of Animal and Veterinary Sciences*, 29(2), 75. <https://doi.org/10.14334/wartazoa.v29i2.2015>
- Wijayanti, I. E., & Kurniawati, E. A. (2019). Studi Kinetika Adsorpsi Isoterm Persamaan Langmuir dan Freundlich pada Abu Gosok sebagai Adsorben. *EduChemia (Jurnal Kimia Dan Pendidikan)*, 4(2), 175. <https://doi.org/10.30870/educhemia.v4i2.6119>
- Wongso, A. B., Nugroho, B., Safriani, R., Faizah, F. N., Novalia, N., & Sulaeman, U. (2024). *Design Of Biochar-nZVI/Graphene Nanosheet For Ciprofloxacin Degradation*. 188–196.
- Xue, W., Shi, X., Guo, J., Wen, S., Lin, W., He, Q., Gao, Y., Wang, R., & Xu, Y. (2024). Affecting factors and mechanism of removing antibiotics and antibiotic resistance genes by nano zero-valent iron (nZVI) and modified nZVI: A critical review. In *Water Research* (Vol. 253). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121309>
- Yustinah, Hudzaifah, Aprilia, M., & AB, S. (2019). *Keseimbangan Adsorpsi Logam Berat (Pb) Dengan Adsorben Tanah Diatomit Secara Batch*.
- Zhang, Y., Li, S., Jiao, Y., Ji, X., Li, Y., Chen, Q., Zhang, X., & Zhang, G. (2025). Efficient removal of enrofloxacin in swine wastewater using eukaryotic-bacterial symbiotic membraneless bioelectrochemical system. *Journal of Hazardous Materials*, 489. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137513>

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **LAMPIRAN A PELAKSANAAN ANALISIS**

### **Lampiran A Pelaksanaan Analisa**

#### **A.1 Pelaksanaan Sintesis Silika dari Sandblasting**

- Alat
  1. 1 buah cawan krusibel
  2. 1 buah Erlenmeyer 250 mL
  3. 1 buah corong
  4. 1 buah kertas saring
  5. 1 buah beaker glass 500 mL
  6. 1 buah pengaduk kaca
  7. 1 buah oven
- Bahan
  1. 1 gr limbah sandblasting
  2. 1,33 gr NaOH
  3. HCl 2M
- Prosedur
  1. Pasir sandblasting yang telah diayak 200 mesh ditimbang dan dicampurkan dengan NaOH dengan perbandingan (1:1,33) gram dan ditambahkan sedikit aquades.
  2. Campuran difusi dimasukkan ke dalam furnace pada suhu 500°C selama 4 jam
  3. Sampel dilarutkan ke dalam aquades dan diendapkan hingga warna lapisan atasnya berwarna hijau kebiruan
  4. Sampel difilter dengan menggunakan kertas saring hingga berwarna kuning bening
  5. Larutan dipresipitasi dengan menggunakan HCl 2 M hingga terbentuk gel warna putih.
  6. Endapan gel dicuci dengan aquades hingga pH netral
  7. Endapan dikeringkan ke dalam oven pada suhu 40°C selama 12 jam 4
  8. Hasil endapan yang telah kering dikalsinasi dengan furnace pada suhu 500°C selama 4 jam

#### **A.2 Pelaksanaan Sintesis nZVI**

- Alat
  1. 2 buah beaker glass 250 mL
  2. Magnetic stirrer
  3. Centrifuge
  4. Pipet ukur
  5. Pengaduk kaca
  6. Tube centrifuge
  7. Buret
- Bahan
  1.  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  4,1703 gr
  2. Aquabidest
  3. CTAB ( $\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{BrN}$ ) 3 gr

4.  $\text{NaBH}_4$  1,892 gr
5.  $\text{NH}_4\text{OH}$  25% s5 ml
- Prosedur
  1.  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0,1 M ditimbang sebanyak 4,1703 g. Kemudian dilarutkan ke dalam 150 mL aquabidest
  2. 3 g CTAB ( $\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{BrN}$ ) ditambahkan kedalam aquabidest sebanyak 100 mL.
  3. Kedua larutan tersebut dicampurkan lalu dilakukan pengadukan menggunakan magnetic stirrer
  4.  $\text{NaBH}_4$  0,5 M sebanyak 1,892 gr dilarutkan ke dalam 100 ml aquabidest kemudian ditambahkan  $\text{NH}_4\text{OH}$  25% sebanyak 5 ml
  5. Larutan dimasukkan ke dalam buret dengan kecepatan 10 mL/menit kedalam larutan  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  dan dilakukan pengadukan dengan magnetic stirrer
  6. Larutan dimasukkan ke dalam tabung centrifuge, lalu dilakukan sentrifugasi dengan kecepatan 3000 rpm selama 5 menit
  7. Endapan yang terbentuk dicuci menggunakan etanol sebanyak 3 kali

### A.3 Pelaksanaan Sintesis Komposit nZVI- $\text{SiO}_2$

- Alat
  1. Magnetic stirrer
  2. 2 buah beaker glass
  3. Buret
  4. Centrifuge
  5. Pengaduk kaca
- Bahan
  1. Silika ( $\text{SiO}_2$ )
  2.  $\text{FeCl}_3$
  3.  $\text{NaBH}_4$
  4. Etanol
- Prosedur
  1.  $\text{SiO}_2$  dicampur dengan  $\text{FeCl}_3$  dalam pelarut etanol selama 7 jam dengan pengadukan kuat
  2. Larutan  $\text{NaBH}_4$  (0,25 M, 50 mL) dimasukkan ke dalam buret dan diteteskan ke dalam larutan yang telah di stirrer dengan laju 10 mL/menit
  3. nZVI- $\text{SiO}_2$  yang terbentuk dalam campuran dipisahkan centrifuge dan dicuci sebanyak 2 kali untuk menghilangkan sisa pengotor

## LAMPIRAN B

### HASIL PERHITUNGAN ADSORPSI

**Tabel 1** Absorbansi Hasil Reduksi ENR Dengan Silika

| pH | Waktu | 2 mg/L | 5 mg/L | 10 mg/L |
|----|-------|--------|--------|---------|
| 3  | 5     | 0,012  | 0,027  | 0,073   |
|    | 10    | 0,006  | 0,021  | 0,053   |
|    | 15    | 0,018  | 0,017  | 0,049   |
|    | 20    | 0,007  | 0,014  | 0,046   |
|    | 30    | 0,006  | 0,013  | 0,04    |
|    | 60    | 0,011  | 0,009  | 0,032   |
| 4  | 5     | 0,198  | 0,529  | 1,007   |
|    | 10    | 0,195  | 0,529  | 1,002   |
|    | 15    | 0,194  | 0,531  | 1,011   |
|    | 20    | 0,191  | 0,533  | 0,993   |
|    | 30    | 0,204  | 0,527  | 0,976   |
|    | 60    | 0,177  | 0,505  | 0,942   |
| 5  | 5     | 0,207  | 0,537  | 1,087   |
|    | 10    | 0,207  | 0,536  | 1,087   |
|    | 15    | 0,206  | 0,534  | 1,08    |
|    | 20    | 0,205  | 0,532  | 1,077   |
|    | 30    | 0,203  | 0,524  | 1,065   |
|    | 60    | 0,202  | 0,518  | 1,057   |

**Tabel 2** Absorbansi Hasil Reduksi ENR Dengan nZVI

| pH | Waktu | 2 mg/L | 5 mg/L | 10 mg/L |
|----|-------|--------|--------|---------|
| 3  | 5     | 0,078  | 0,264  | 0,62    |
|    | 10    | 0,074  | 0,218  | 0,546   |
|    | 15    | 0,069  | 0,178  | 0,459   |
|    | 20    | 0,06   | 0,161  | 0,411   |
|    | 30    | 0,058  | 0,137  | 0,364   |
|    | 60    | 0,056  | 0,11   | 0,341   |
| 4  | 5     | 0,096  | 0,245  | 0,493   |
|    | 10    | 0,083  | 0,216  | 0,432   |
|    | 15    | 0,082  | 0,202  | 0,414   |
|    | 20    | 0,078  | 0,191  | 0,402   |
|    | 30    | 0,074  | 0,192  | 0,364   |
|    | 60    | 0,065  | 0,163  | 0,34    |
| 5  | 5     | 0,059  | 0,233  | 0,594   |
|    | 10    | 0,055  | 0,225  | 0,526   |
|    | 15    | 0,049  | 0,195  | 0,498   |
|    | 20    | 0,047  | 0,188  | 0,478   |
|    | 30    | 0,044  | 0,177  | 0,46    |
|    | 60    | 0,042  | 0,165  | 0,384   |

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## LAMPIRAN C KARAKTERISASI

### SEM-EDX Silika

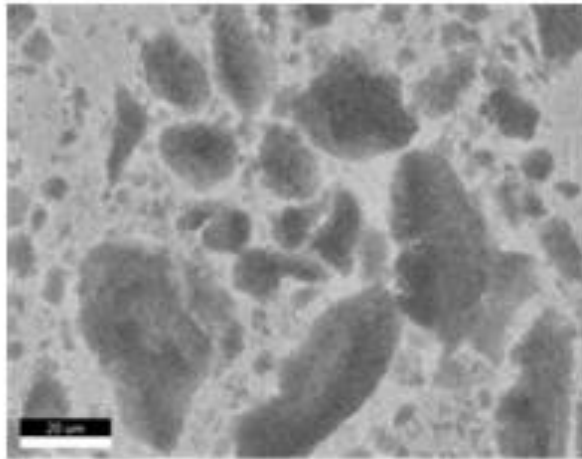
EDAX APEX

Page 1

02032026

Author: Teknik Mesin ITS  
Creation: 04/01/2026 12:32:33 PM  
Sample Name: listya TL

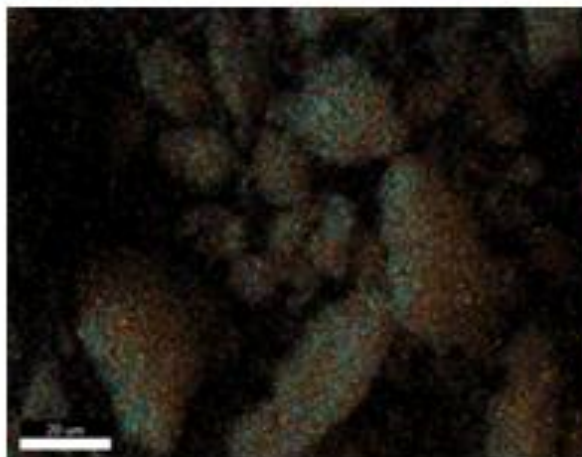
sil



Image

PhaseROI 3

ElementOverlay

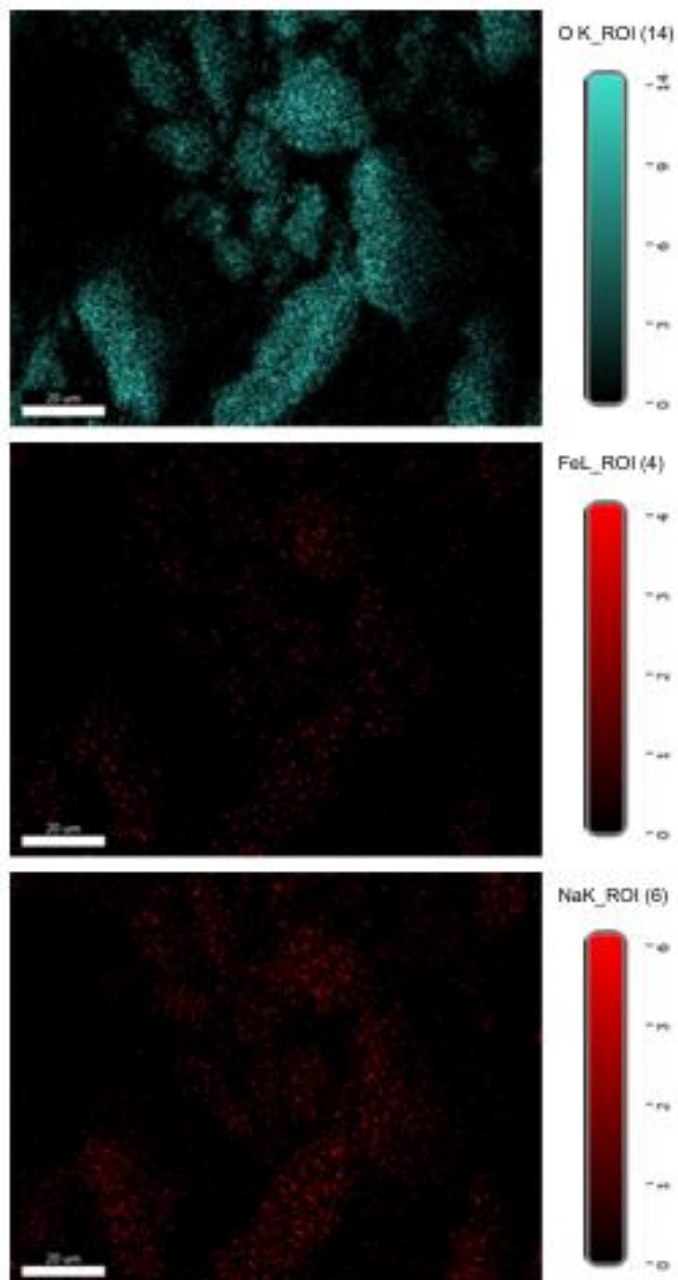


|         |
|---------|
| 24% O K |
| 1% FeL  |
| 3% NaK  |
| 2% MgK  |
| 5% AlK  |
| 62% SiK |
| 4% CaK  |

## SEM-EDX Silika

EDAX APEX

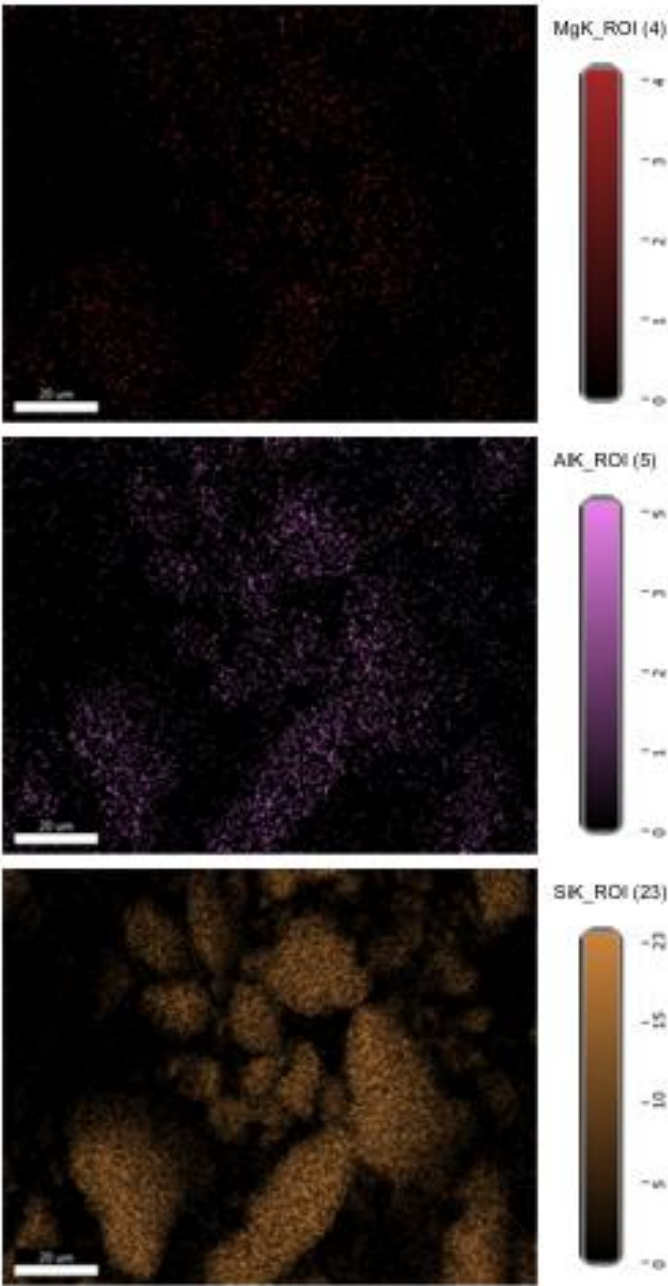
Page 2



SEM-EDX Silika

EDAX APEX

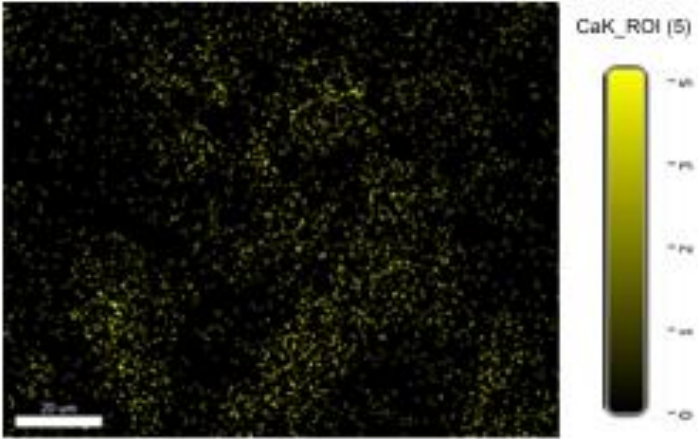
Page 3



SEM-EDX Silika

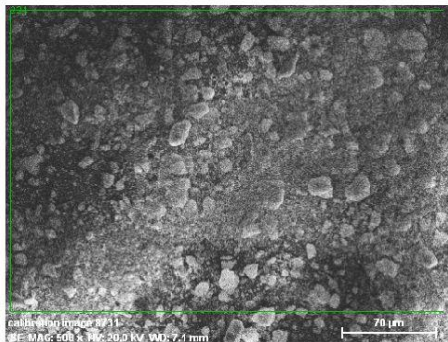
EDAX APEX

Page 4

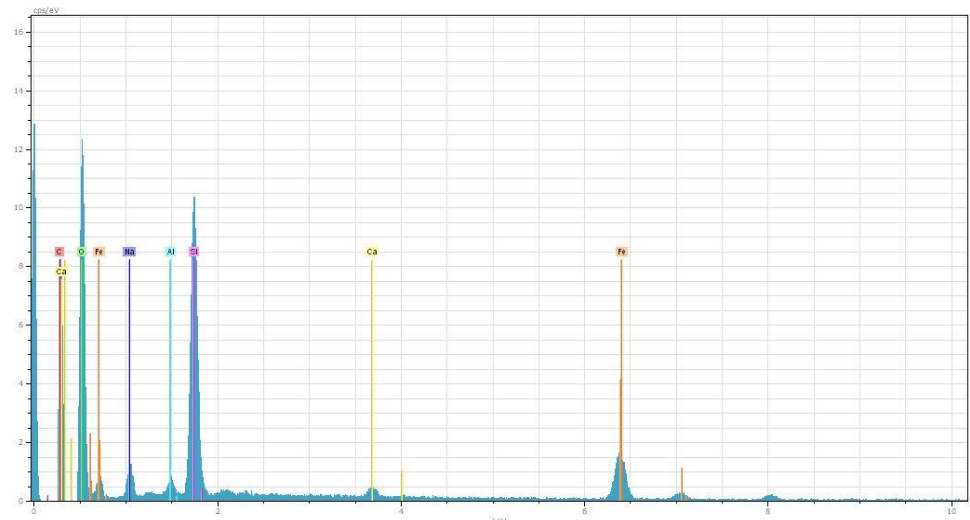


SEM-EDX Komposit

Komposit nZVI-SiO2



calibration image 8731Date:6/4/2026 1:54:25 PMImage size:512 x 384Mag:500xHV:20.0kV



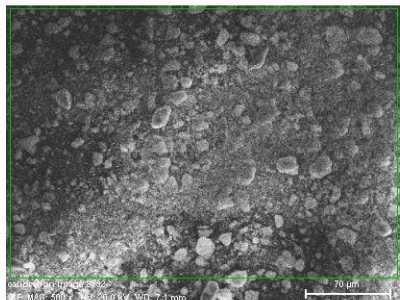
224 Date:6/4/2026 1:54:58 PM HV:20.0kV Puls th.:4.00kcps

| El     | AN | Series   | unn. C [wt.%] | norm. C [wt.%] | Atom. C [at.%] | Error [%] |
|--------|----|----------|---------------|----------------|----------------|-----------|
| O      | 8  | K-series | 49.72         | 52.96          | 59.06          | 6.3       |
| C      | 6  | K-series | 16.30         | 17.36          | 25.79          | 2.3       |
| Fe     | 26 | K-series | 11.80         | 12.57          | 4.01           | 0.4       |
| Si     | 14 | K-series | 11.78         | 12.55          | 7.97           | 0.5       |
| Na     | 11 | K-series | 2.73          | 2.91           | 2.26           | 0.2       |
| Ca     | 20 | K-series | 0.83          | 0.88           | 0.39           | 0.1       |
| Al     | 13 | K-series | 0.73          | 0.78           | 0.52           | 0.1       |
| Total: |    |          | 93.87         | 100.00         | 100.00         |           |

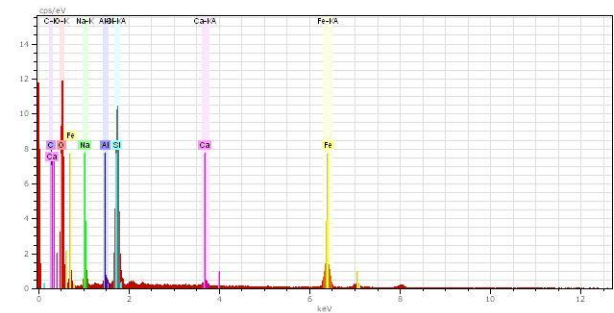
6/4/2026

1. Page

Komposit nZVI-SiO<sub>2</sub>

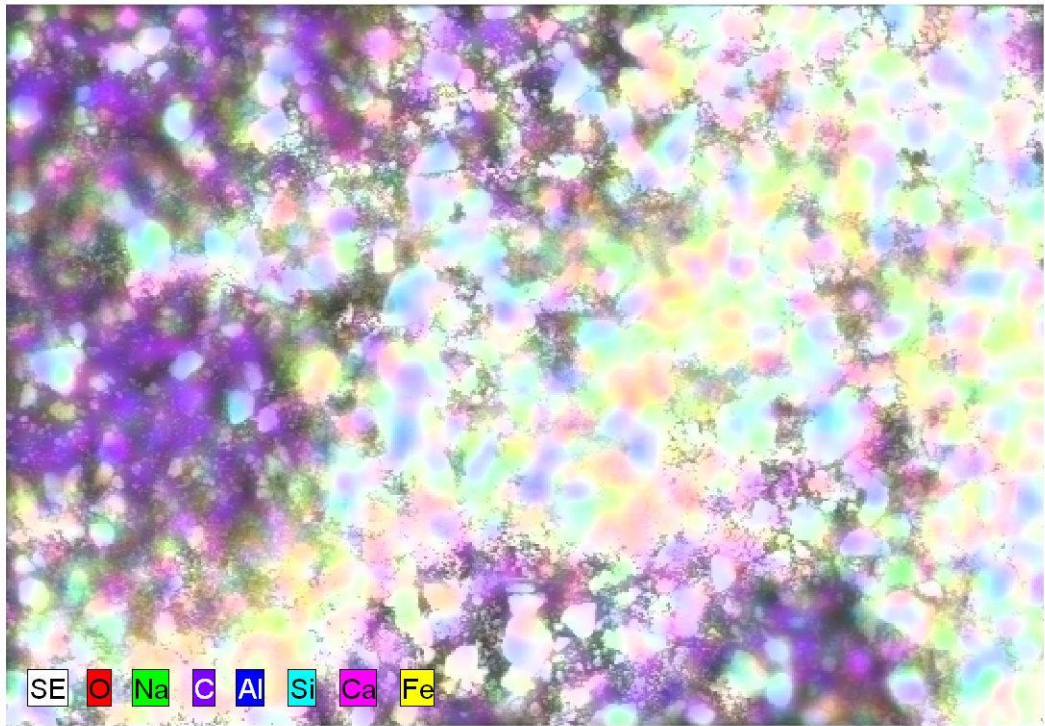


calibration image 8732Date:6/4/2026 1:54:25  
PMImage size:512 x 384Mag:500xHV:20.0kV

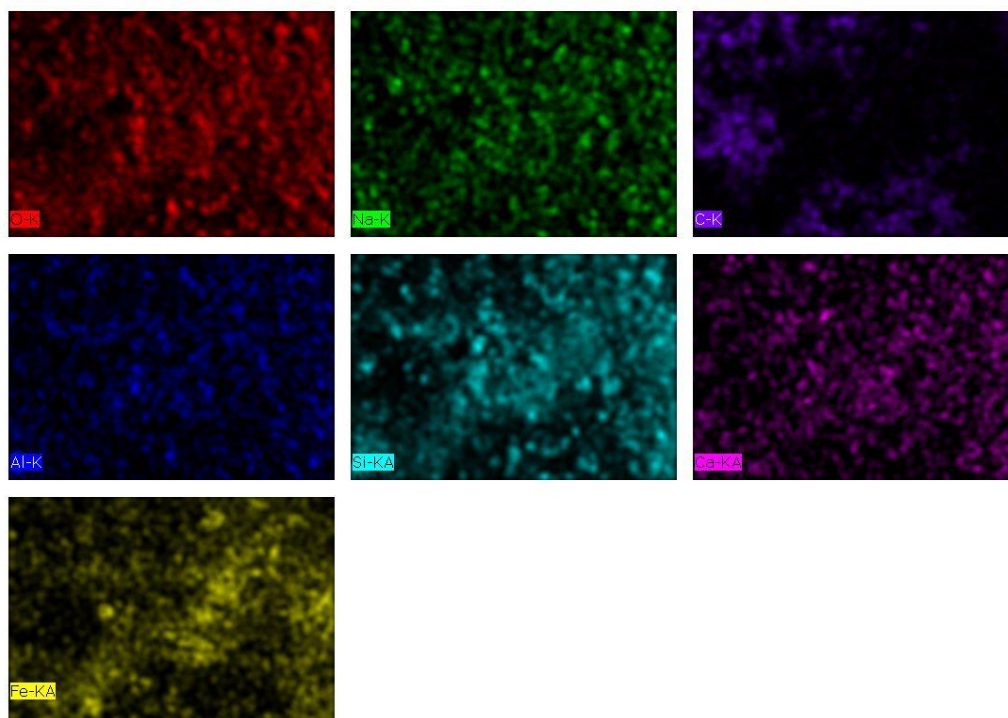


Map Date:6/4/2026 1:56:33 PM HV:20.0kV  
Puls th.:3.59kcp/s

calibration image 21 7401Date:6/4/2026 1:56:34 PMImage size:501 x 348Mag:500xHV:20.0kV

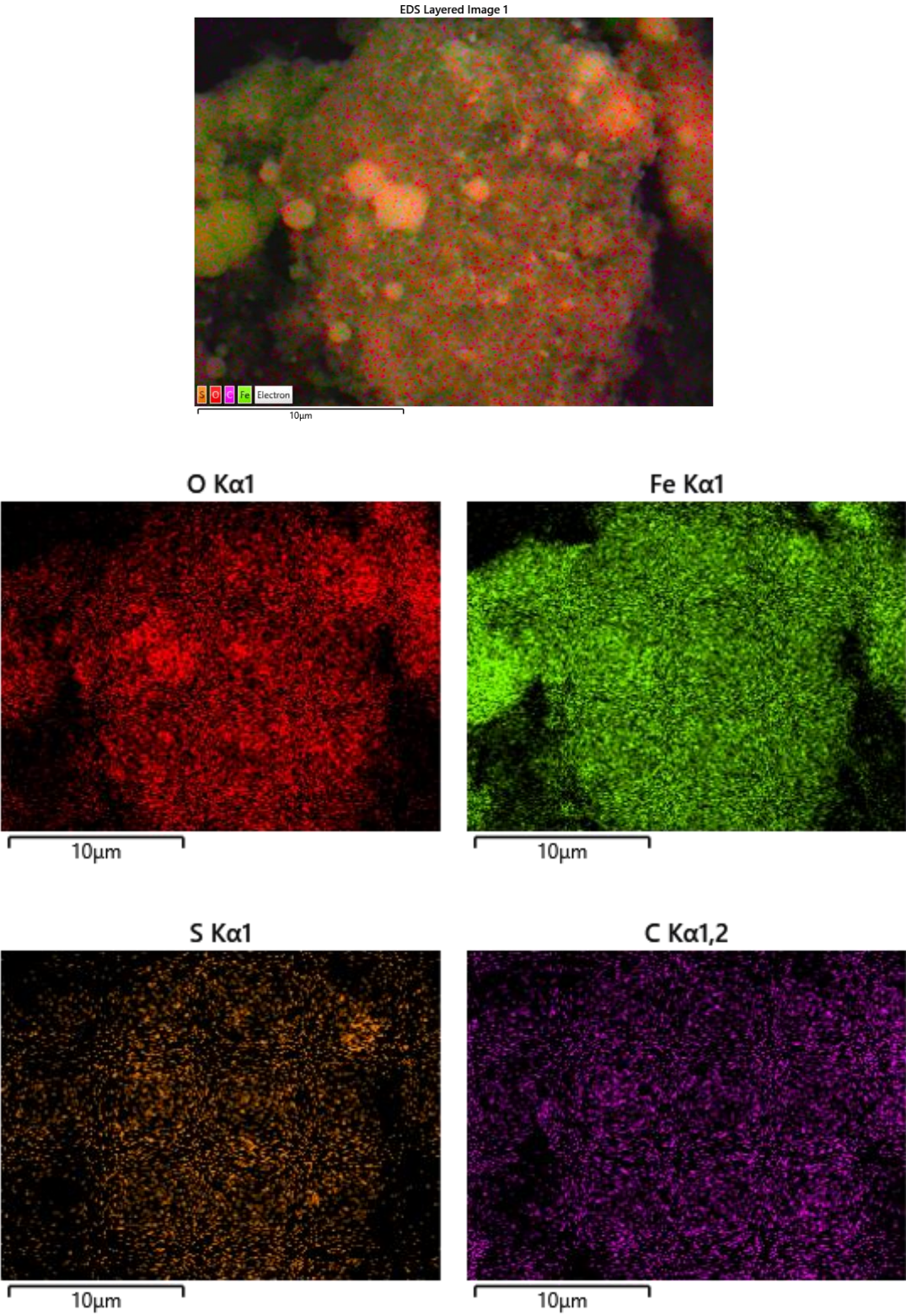


## SEM-EDX Komposit nZVI-SiO<sub>2</sub>



O-K, Na-K, C-K, Al-K, Si-KA, Ca-KA, Fe-KA Date: 6/4/2026 1:57:18 PM  
Image size: 501 x 348  
Mag: 500x  
HV: 20.0kV

SEM-EDX NZVI



FTIR Silika



Sample ID:Silika

Sample Scans:16

Background Scans:16

Resolution:16

System Status:Good

File Location:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\2022-12-09 STR\Silika\_2026-04-02T08-32-47.a2r

Method

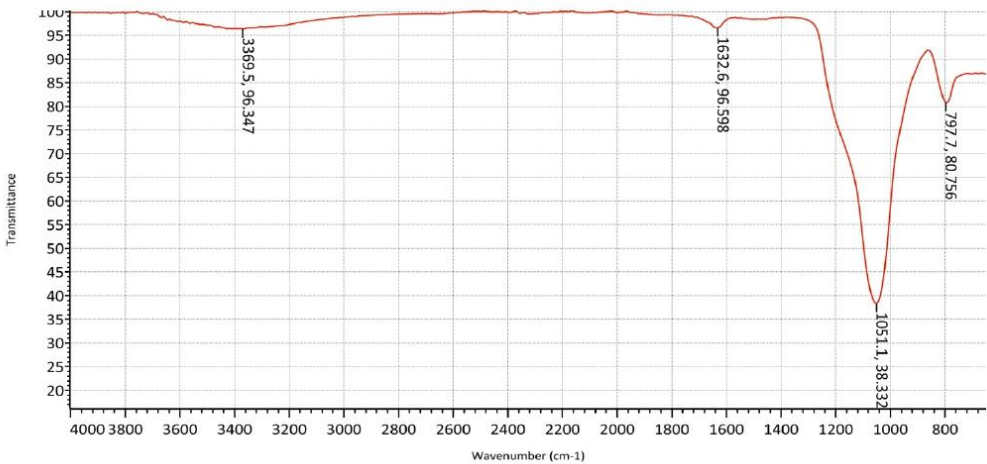
Name:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Methods\Data sampel.a2m

User:admin

Date/Time:04/02/2026 8:32:47 AM

Range:4000 - 650

Apodization:Happ-Genzel



| Peak Number | Wavenumber (cm <sup>-1</sup> ) | Intensity |
|-------------|--------------------------------|-----------|
| 1           | 797.7                          | 80.756    |
| 2           | 1051.1                         | 38.332    |
| 3           | 1632.6                         | 96.598    |
| 4           | 3369.5                         | 96.347    |

FTIR Komposit nZVI-SiO<sub>2</sub>



Sample ID:Komposit B

Sample Scans:16

Background Scans:16

Resolution:16

System Status:Good

File Location:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\2022-12-09 STR\Komposit B\_2026-05-12T11-11-14.a2r

Method

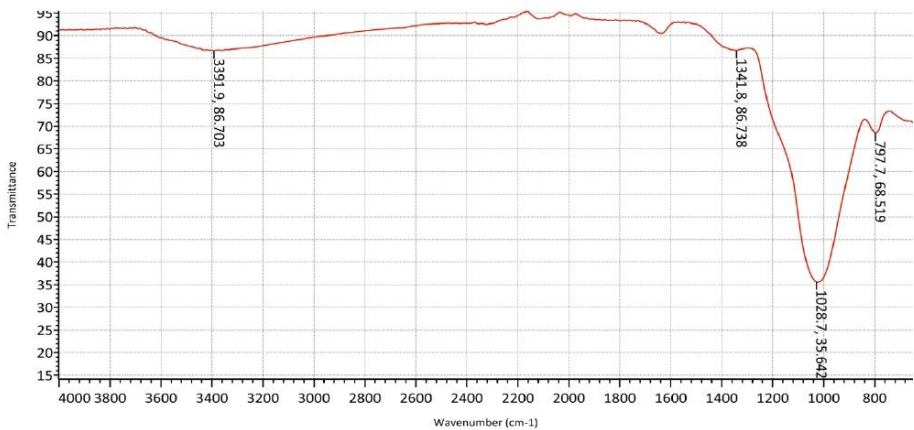
Name:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Methods\Data sampel.a2m

User:admin

Date/Time:05/12/2026 11:11:14 AM

Range:4000 - 650

Apodization:Happ-Genzel



| Peak Number | Wavenumber (cm <sup>-1</sup> ) | Intensity |
|-------------|--------------------------------|-----------|
| 1           | 797.7                          | 68.519    |
| 2           | 1028.7                         | 35.642    |
| 3           | 1341.8                         | 86.738    |
| 4           | 3391.9                         | 86.703    |

FTIR NZVI



Sample ID:nZVI

Sample Scans:16

Background Scans:16

Resolution:16

System Status:Good

File Location:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\2022-12-09 STR\nZVI\_2026-05-12T11-03-24.a2r

Method

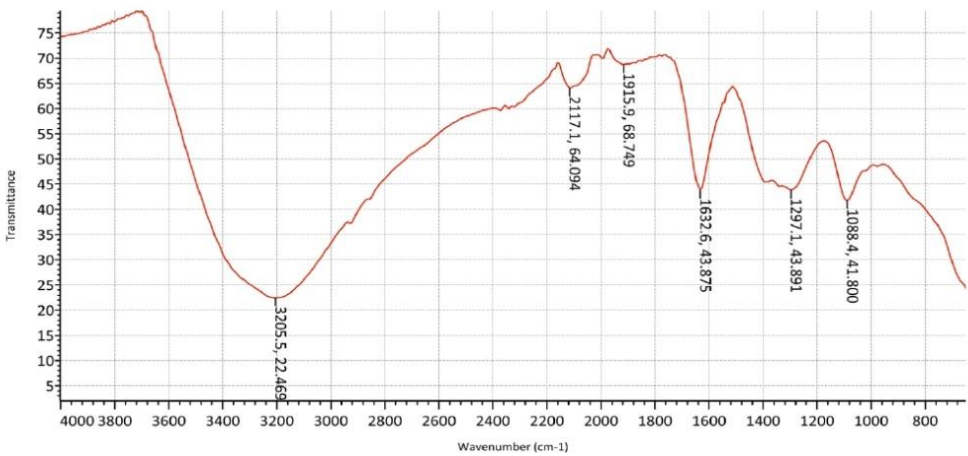
Name:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Methods\Data sampel.a2m

User:admin

Date/Time:05/12/2026 11:03:24 AM

Range:4000 - 650

Apodization:Happ-Genzel



| Peak Number | Wavenumber (cm <sup>-1</sup> ) | Intensity |
|-------------|--------------------------------|-----------|
| 1           | 1088.4                         | 41.800    |
| 2           | 1297.1                         | 43.891    |
| 3           | 1632.6                         | 43.875    |
| 4           | 1915.9                         | 68.749    |
| 5           | 2117.1                         | 64.094    |

|   |        |        |
|---|--------|--------|
| 6 | 3205.5 | 22.469 |
|---|--------|--------|

## HPLC ENR



Laboratorium Instrumentasi Analisis  
Program Studi Teknik Kimia  
Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya  
Jl. Kalijudan 37 Surabaya 60114 Telp: +62 31 3893933 Fax: +62 31 3891267  
Website: <https://www.chemeng.ukwms.ac.id/>

### Analisa Enrofloxacin

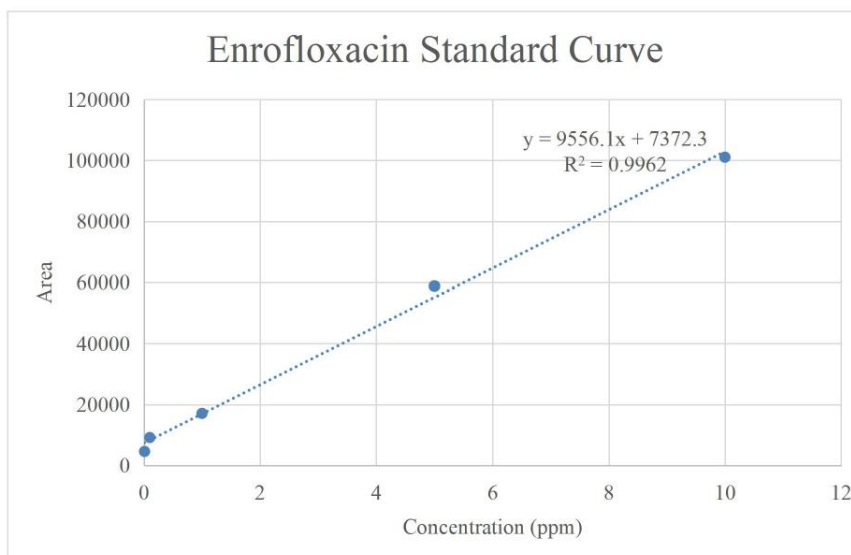
#### Metode Analisa

Analisa sample dilakukan menggunakan HPLC (*High Performance Liquid Chromatography*) (Jasco) dilengkapi dengan pompa (PU-2089 Plus, Jasco) dan detektor UV/Vis (UV-2077 Plus, Jasco). Kolom yang digunakan adalah kolom Surf C-18 100A 5 $\mu$ m 250x4.6mm (ImChem). Setiap mobile phase yang dibuat difiltrasi dengan membran filter hidrofilik 0,45  $\mu$ m (Labfil) dan disonikasi untuk menghilangkan gas terlarut. Pelarut yang digunakan adalah Aquabidest. Setiap sample difilter dengan membran PVDF 0,22  $\mu$ m sebelum injeksi. Metode analisa yang dilakukan adalah sebagai berikut:

Mobile phase yang digunakan adalah 0,1% asam format (A) dan acetonitrile (B) dengan perbandingan A:B (80:20). *Running time* adalah 25 menit. Flow rate adalah 0,5 mL/menit; Volume sample yang diinjeksikan sebesar 5 $\mu$ L; Panjang gelombang deteksi adalah 277 nm. Setiap sample tidak diencerkan.

Catatan : ppm = mg/L

#### Hasil Analisa Standar





Laboratorium Instrumentasi Analisis  
 Program Studi Teknik Kimia  
 Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya  
 Jl. Kalijudan 37 Surabaya 60114 Telp: +62 313893933 Fax: +62 31 3891267  
 Website: <https://www.chemeng.ukwms.ac.id/>

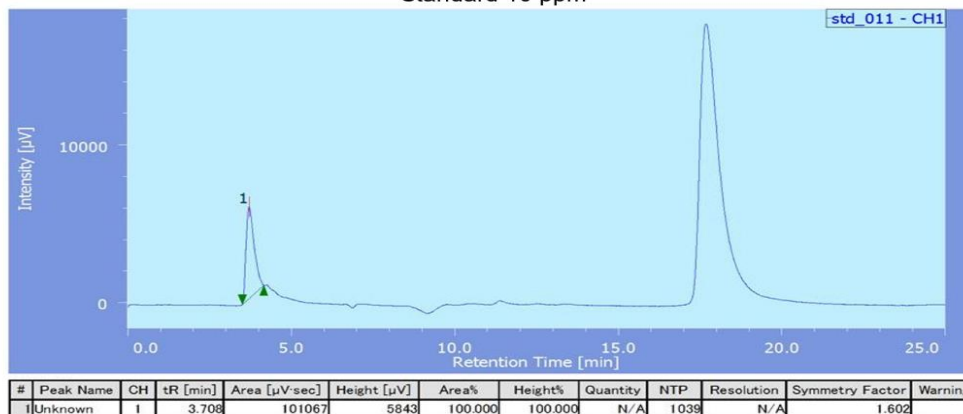
| Konsentrasi Standar (ppm) | Area   |
|---------------------------|--------|
| 10                        | 101067 |
| 5                         | 58839  |
| 1                         | 17109  |
| 0,1                       | 9177   |
| 0,01                      | 4619   |

#### Hasil Analisa Sample

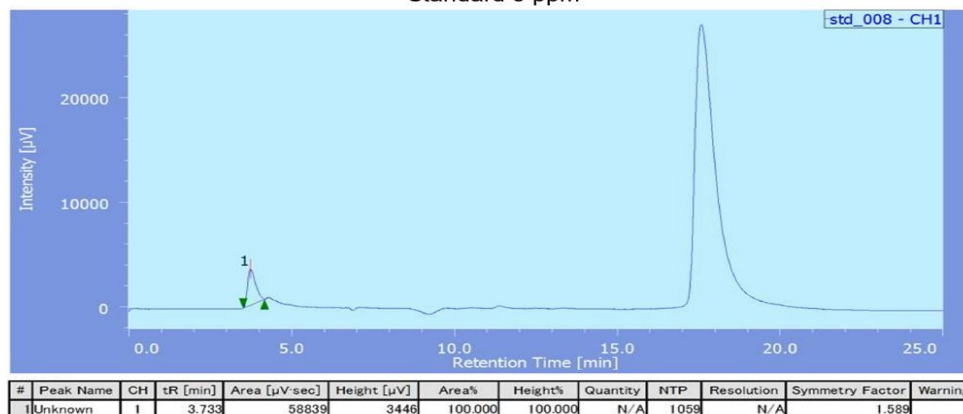
| Sample         | Area  | Konsentrasi (ppm) |
|----------------|-------|-------------------|
| Roxine 1 mg/L  | 3119  | < 0,01            |
| Roxine 2 mg/L  | 4513  | < 0,01            |
| Roxine 5 mg/L  | 10239 | 0,3000            |
| Roxine 8 mg/L  | 20930 | 1,4187            |
| Roxine 10 mg/L | 34596 | 2,8488            |

#### LAMPIRAN

Standard 10 ppm



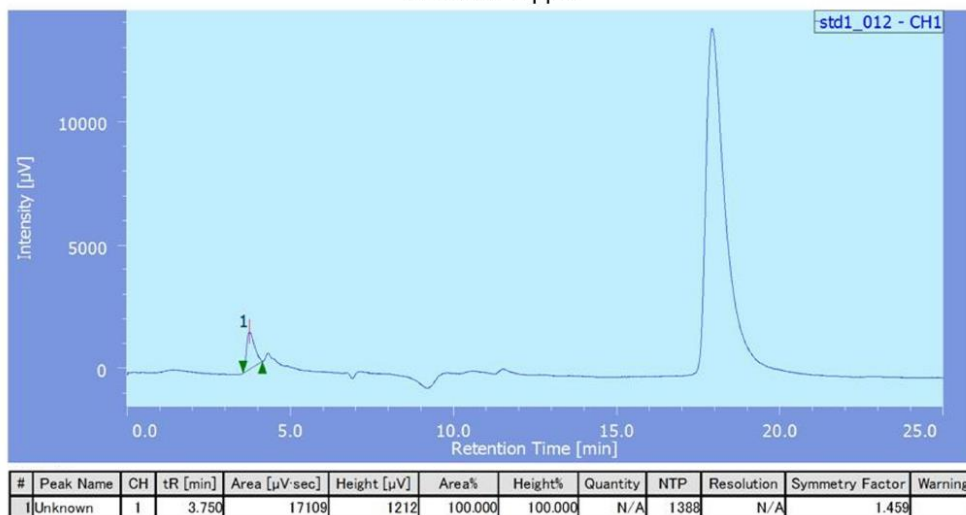
#### Standard 5 ppm



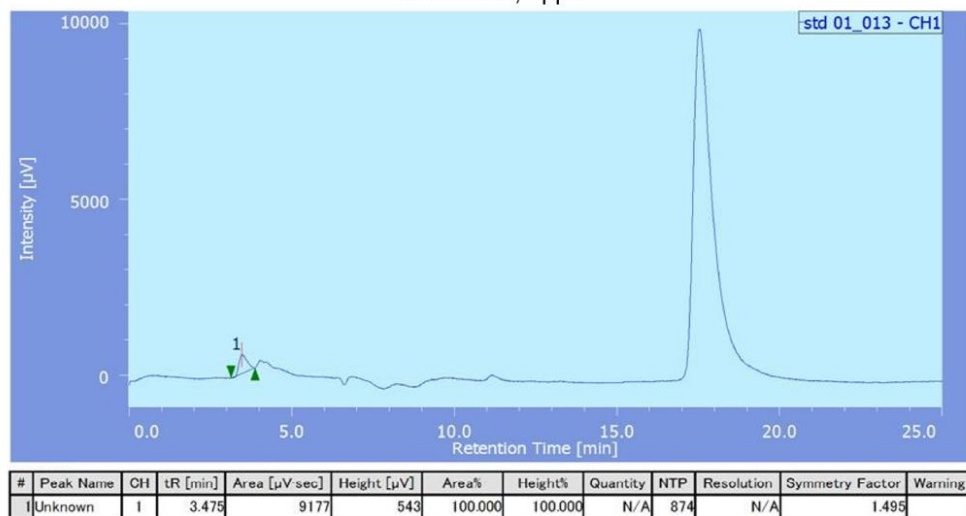


Laboratorium Instrumentasi Analisis  
Program Studi Teknik Kimia  
Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya  
Jl. Kalijudan 37 Surabaya 60114 Telp: +62 31 3893933 Fax: +62 31 3891267  
Website: <https://www.chemeng.ukwms.ac.id/>

Standard 1 ppm

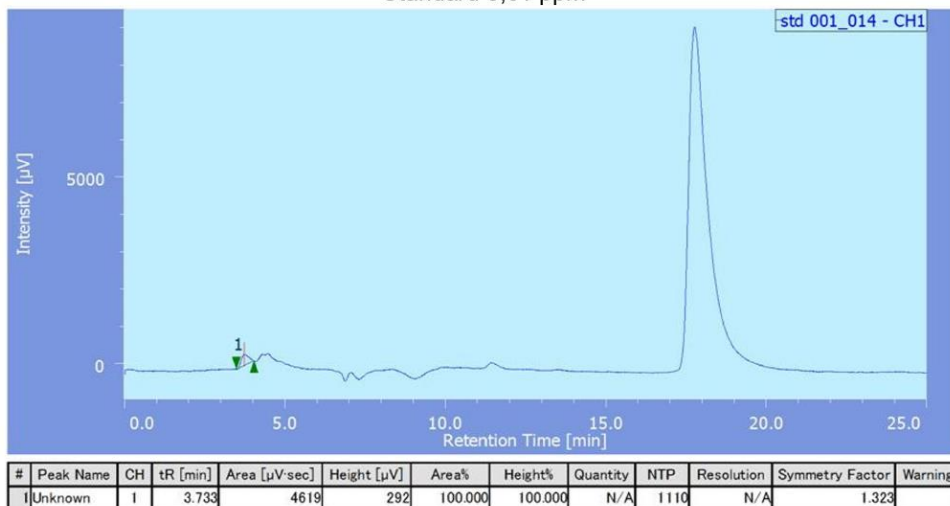


Standard 0,1 ppm

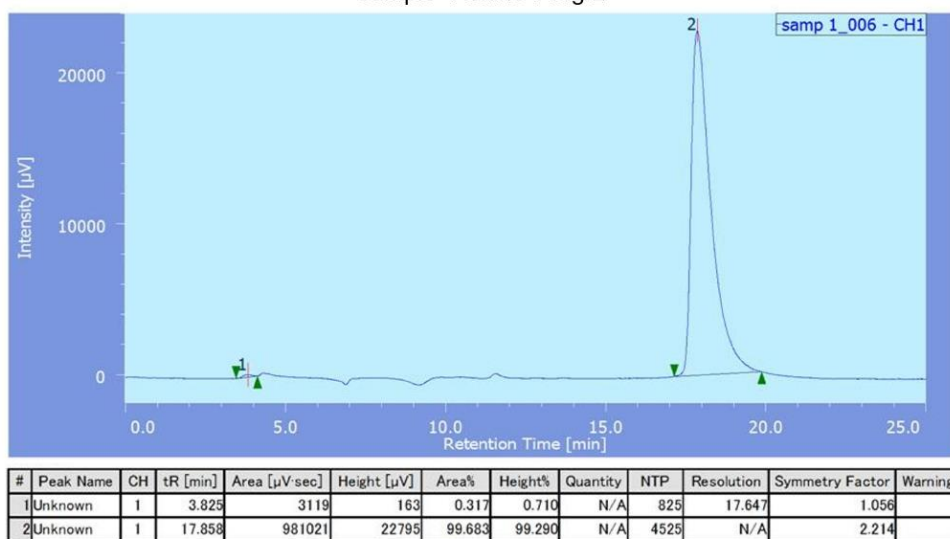




Standard 0,01 ppm

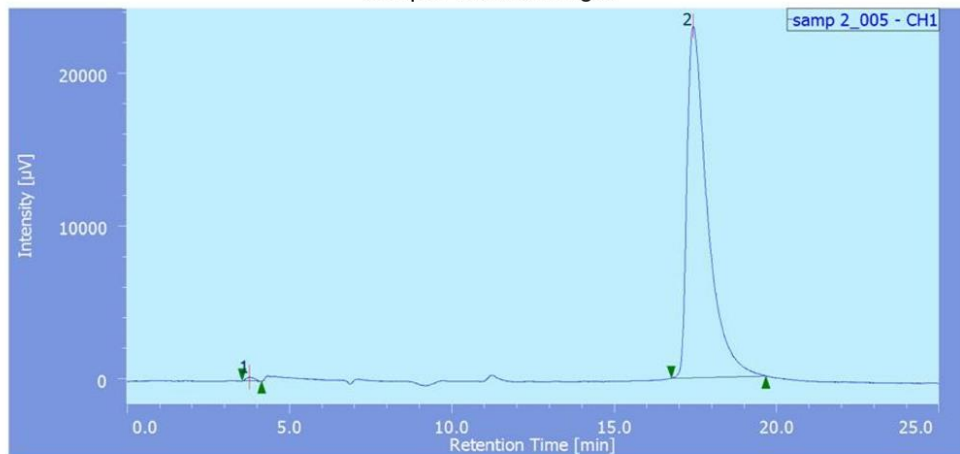


Sample "Roxine 1 mg/L"



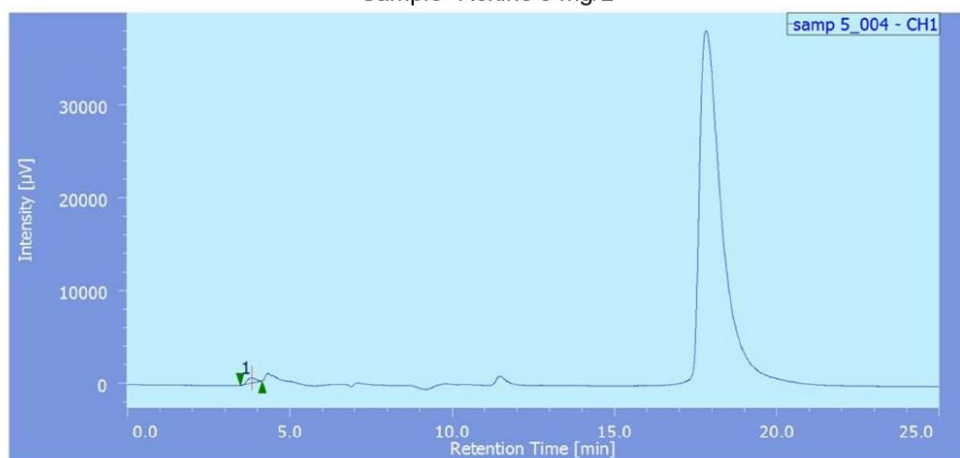


Sample "Roxine 2 mg/L"



| # | Peak Name | CH | tR [min] | Area [µV·sec] | Height [µV] | Area%  | Height% | Quantity | NTP  | Resolution | Symmetry Factor | Warning |
|---|-----------|----|----------|---------------|-------------|--------|---------|----------|------|------------|-----------------|---------|
| 1 | Unknown   | I  | 3.767    | 4513          | 262         | 0.447  | 1.126   | N/A      | 907  | 17.549     | 1.291           |         |
| 2 | Unknown   | I  | 17.425   | 1004317       | 22991       | 99.553 | 98.874  | N/A      | 4320 | N/A        | 2.258           |         |

Sample "Roxine 5 mg/L"

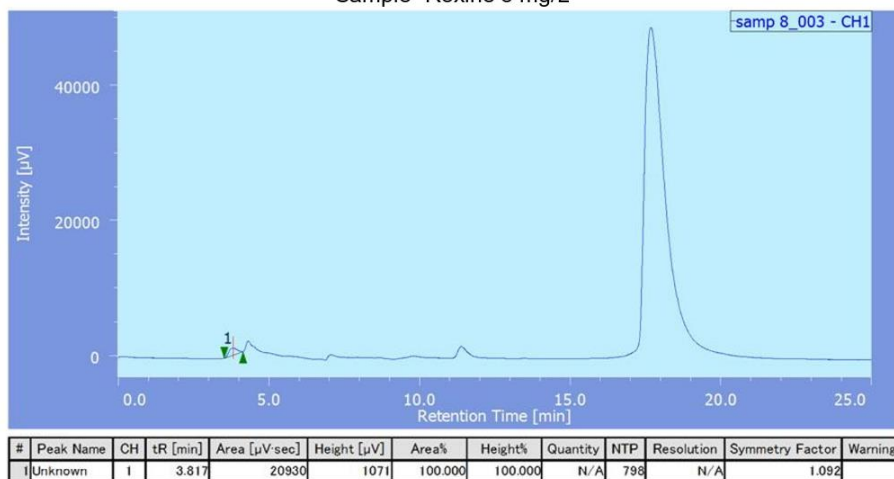


| # | Peak Name | CH | tR [min] | Area [µV·sec] | Height [µV] | Area%   | Height% | Quantity | NTP | Resolution | Symmetry Factor | Warning |
|---|-----------|----|----------|---------------|-------------|---------|---------|----------|-----|------------|-----------------|---------|
| 1 | Unknown   | I  | 3.825    | 10239         | 523         | 100.000 | 100.000 | N/A      | 795 | N/A        | 1.136           |         |

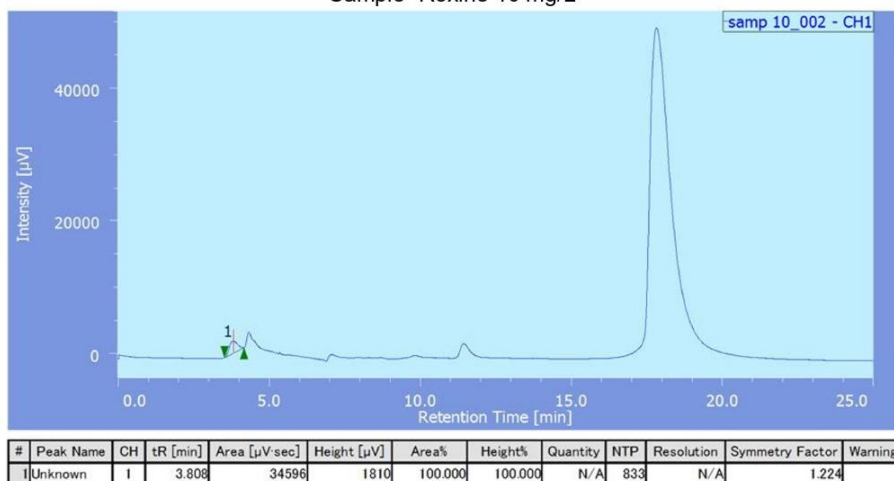


Laboratorium Instrumentasi Analisis  
Program Studi Teknik Kimia  
Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya  
Jl. Kalijudan 37 Surabaya 60114 Telp: +62 31 3893933 Fax: +62 31 3891267  
Website: <https://www.chemeng.ukwms.ac.id/>

Sample "Roxine 8 mg/L"



Sample "Roxine 10 mg/L"



## BET Silika



### UPN "VETERAN" JAWA TIMUR

UPA LABORATORIUM TERPADU  
Gd. Research Center  
Anton Paar Kaomi for NOVA v1.01



Report date: 05/11/2026 Operator: AP  
File Name: RC\_070\_1.qcuPhysIso

#### Analysis Information

**Sample**  
ID RC\_070\_1  
Name SILIKA  
Weight 0.1478g

**Analysis**  
Data ID {ac2b16fe-7db9-44fb-ba82-9b9608879828}  
Analysis Profile N2 full isotherm  
Operator AP Date 04/30/2026  
Instrument St 4 on NOVA 800 [s/n:1050051653] Duration 291.93min  
Ambient Temp. 24.44 °C Void Volume Mode NOVA Mode Firmware 1.03  
Sample Volume 0.000 cm³ Sample Volume Mode Measured Cell ID B1FR1  
Thermal Delay 180 sec p<sub>e</sub> Mode Monitor Cell Type 9 mm with filler rod

**Adsorbate**  
Name Nitrogen Molecular Weight 28.0134 g/mol Cross Sectional Area 16.2 Å<sup>2</sup>/molecule  
Non-Ideality 6.58e-05 1/T<sub>orr</sub> Bath Temperature 77.35 K

**Degas information**  
Type Vacuum Degassing  
Operator AP  
Heating Heat to 150.0 °C at 20.0 °C/min then hold for 360 min

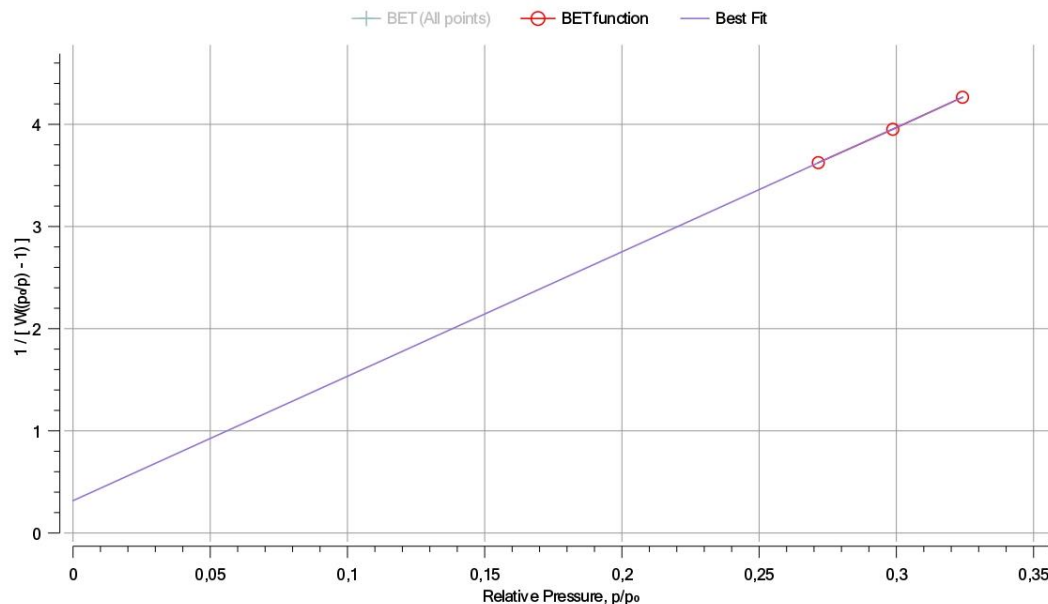
#### Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration no  
**Adsorbate Model**  
Name Nitrogen Molecular Weight 28.0134 g/mol Cross Sectional Area 16.2 Å<sup>2</sup>/molecule  
Bath Temperature 77.35 K

#### BET Multipoint BET Results

Adsorption  
Isotherm Branch 12.1781  
Slope 0.316572  
Intercept 0.999967  
Correlation coeff., r 39.4685  
C constant 278.721 m<sup>2</sup>/g  
Surface area

#### Graph - BET Multipoint BET



## BET Silika



### UPN "VETERAN" JAWA TIMUR

UPA LABORATORIUM TERPADU  
Gd. Research Center  
Anton Paar Kaomi for NOVA v1.01



Report date: 05/11/2026  
File Name: RC\_070\_1.qcuPhysIso  
Operator: AP

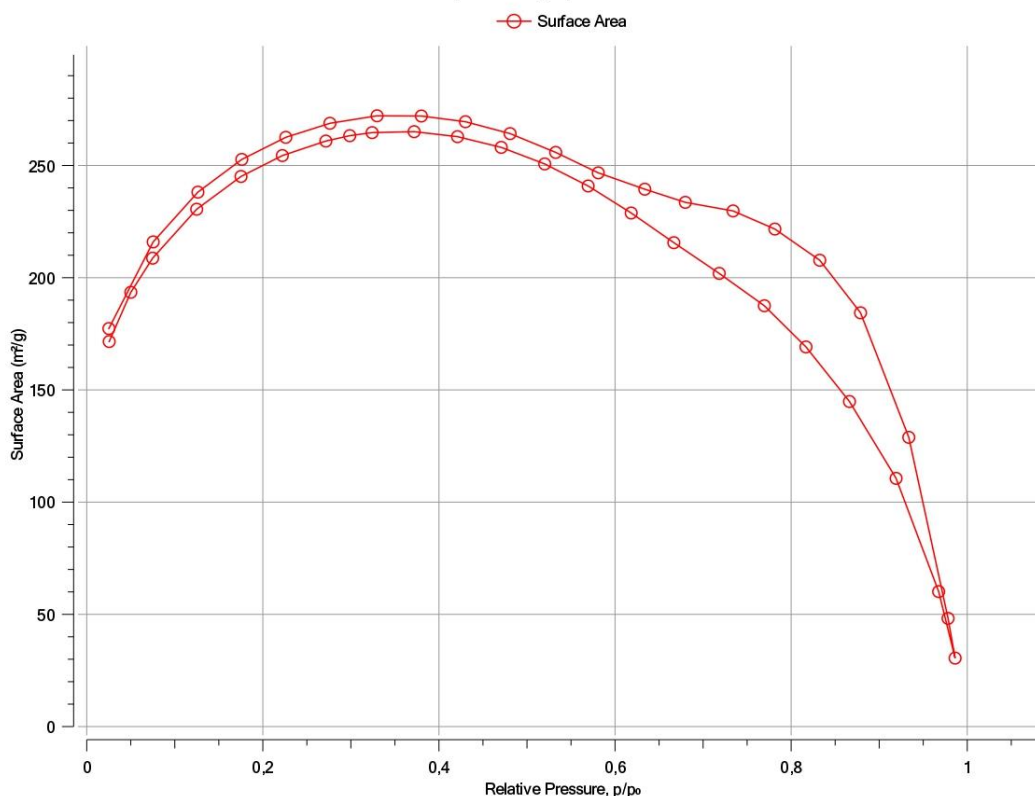
#### Analysis Information

|                          |                                                       |                           |                 |                      |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------|----------------------|
| <b>Sample</b>            | ID                                                    | RC_070_1                  | <b>Weight</b>   | 0.1478g              |
|                          | Name                                                  | SILIKA                    |                 |                      |
| <b>Analysis</b>          |                                                       |                           |                 |                      |
| <b>Data ID</b>           | {ac2b16fe-7db9-44fb-ba82-9b9608879828}                |                           |                 |                      |
| <b>Analysis Profile</b>  | N2 full isotherm                                      |                           |                 |                      |
| <b>Operator</b>          | AP                                                    | <b>Date</b>               | 04/30/2026      |                      |
| <b>Instrument</b>        | St 4 on NOVA 800 [s/n: 1050051653]                    |                           | <b>Duration</b> | 291.93min            |
| <b>Ambient Temp.</b>     | 24.44 °C                                              | <b>Void Volume Mode</b>   | NOVA Mode       | <b>Firmware</b>      |
| <b>Sample Volume</b>     | 0.000 cm <sup>3</sup>                                 | <b>Sample Volume Mode</b> | Measured        | 1.03                 |
| <b>Thermal Delay</b>     | 180 sec                                               | <b>p<sub>0</sub> Mode</b> | Monitor         | <b>Cell ID</b>       |
| <b>Adsorbate</b>         | Nitrogen                                              | <b>Molecular Weight</b>   | 28.0134 g/mol   | <b>Cell Type</b>     |
| <b>Non-Ideality</b>      | 6.58e-05 1/Torr                                       | <b>Bath Temperature</b>   | 77.35 K         | 9 mm with filler rod |
| <b>Degas information</b> |                                                       |                           |                 |                      |
| <b>Type</b>              | Vacuum Degassing                                      |                           |                 |                      |
| <b>Operator</b>          | AP                                                    |                           |                 |                      |
| <b>Heating</b>           | Heat to 150.0 °C at 20.0 °C/min then hold for 360 min |                           |                 |                      |

#### Data Reduction Parameters

Thermal Transpiration no

#### Graph - BET Single-point BET



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Maharesmi Listya Azzahra, lahir di Madiun pada 28 April 2003. Penulis merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Penulis telah menyelesaikan pendidikan formal di SD Mejoyan 1 (2010-2016), SMP Negeri 1 Mejoyan (2016-2019), dan SMA Negeri 1 Mejoyan (2019-2022). Pendidikan sarjana (S1) dilanjutkan pada Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihatan Institut Teknologi Sepuluh Nopember lewat jalur undangan SNMPTN (Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri) pada tahun 2022 dengan nomor registrasi pokok 5014221029. Selama perkuliahan penulis aktif di organisasi himpunan maupun kepanitiaan yang ada di ITS. Pada tahun 2023 penulis berpartisipasi pada kepanitiaan di ITS yaitu GERIGI ITS 2023 menjadi staff konsumsi. Pada tahun 2024 penulis berkesempatan menjadi staff ahli konsumsi Civplan Olympics 2024 dan berpartisipasi dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) ITS sebagai staff divisi kewirausahaan. Pada tahun 2025 penulis berkesempatan menjadi sekretaris komunitas di Komunitas Pecinta dan Pemerhati Lingkungan (KPPL) pada periode jabatan 2025/2026. Penulis pernah mengikuti kerja praktik di PT. SIG Pabrik Tuban. Bagi para pembaca yang ingin berdiskusi lebih lanjut dapat menghubungi penulis melalui *email* maharesmilistya6@gmail.com.