

TUGAS AKHIR - CL234801

PENGARUH PENAMBAHAN BIJI KELOR (*MORINGA OLEIFERA*) PADA PROSES PENGKONDISIAN LUMPUR MENGANDUNG *ALUMINIUM SULFAT* DAN *POLY ALUMINIUM CHLORIDE* (PAC)

ANI ANGGRAENI

NRP. 5014211060

Dosen Pembimbing

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

NIP.19730601 200003 1 001

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025



TUGAS AKHIR - CL234801

PENGARUH PENAMBAHAN BIJI KELOR (*MORINGA OLEIFERA*) PADA PROSES PENGKONDISIAN LUMPUR MENGANDUNG *ALUMINIUM SULFAT* DAN *POLY ALUMINIUM CHLORIDE* (PAC)

ANI ANGGRAENI

NRP. 5014211060

Dosen Pembimbing

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

NIP.19730601 200003 1 001

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025



FINAL PROJECT - CL234801

**EFFECT OF ADDING *MORINGA OLEIFERA* SEED ON THE
CONDITIONING PROCESS OF SLUDGE CONTAINING
ALUMINIUM SULFATE AND POLY ALUMINIUM
CHLORIDE (PAC)**

ANI ANGGRAENI

NRP. 5014211060

Advisor

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

NIP.19730601 200003 1 001

Undergraduate Study Program

Department of Environmental Engineering

Faculty of Civil Engineering, Planning, and Geo Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH PENAMBAHAN BIJI KELOR (*MORINGA OLEIFERA*) PADA PROSES PENGKONDISIAN LUMPUR MENGANDUNG ALUMINIUM SULFAT DAN POLY ALUMINIUM CHLORIDE (PAC)

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
Memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Lingkungan
Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **Ani Anggraeni**
NRP. 5014211060

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

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

Pembimbing

2. Prof. Ir. Eddy Setiadi Soedjono, Dipl. SE., M.Sc., Ph.D.

Penguji

3. Alfian Purnomo, S.T., M.T.

Penguji

4. Achmad Muzakky, S.T., M.Sc.

Penguji



PERNYATAAN ORISINALITAS

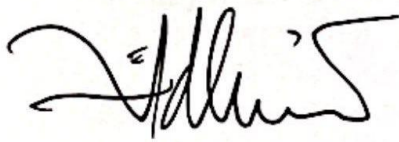
Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa / NRP : Ani Anggraeni / 5014211060
Departemen : Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing / NIP : Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D. / 19730601 200003 1 001

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul **"Pengaruh Penambahan Biji Kelor (*Moringa oleifera*) Pada Proses Pengkondisian Lumpur Mengandung Aluminium Sulfat Dan *Poly Aluminium Chloride* (PAC)"** adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah. Bilamana dikemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Mengetahui,
Dosen Pembimbing

Surabaya, 24 Juli 2025
Mahasiswa



Adhi Yuniarto, ST., MT., Ph.D.
NIP. 19730601 200003 1 001



Ani Anggraeni
NRP. 5014211060

ABSTRAK

PENGARUH PENAMBAHAN BIJI KELOR (*MORINGA OLEIFERA*) PADA PROSES PENGKONDISIAN LUMPUR MENGANDUNG *ALUMINIUM SULFAT* DAN *POLY ALUMINIUM CHLORIDE* (PAC)

Nama Mahasiswa/NRP : Ani Anggraeni / 5014211060

Departemen : Teknik Lingkungan FTSPK - ITS

Dosen Pembimbing : Adhi Yuniarto, ST., MT., Ph.D.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan pengaruh penambahan biji kelor (*Moringa oleifera*), mengkarakterisasi senyawa aktif biji kelor, dan menentukan dosis optimal biji kelor dalam proses pengkondisian lumpur yang mengandung Aluminium Sulfat (alum) dan *Poly Aluminium Chloride* (PAC) guna meningkatkan efisiensi *dewatering*. Penggunaan bahan kimia seperti alum dan PAC telah terbukti efektif, namun memiliki keterbatasan berupa biaya tinggi serta potensi dampak lingkungan sehingga diperlukan alternatif bahan alami yang lebih ramah lingkungan. Biji kelor mengandung protein bermuatan positif yang efektif dalam proses flokulasi partikel tersuspensi melalui mekanisme netralisasi muatan, *bridging flocculation*, dan adsorpsi fisik.

Penelitian ini menggunakan variasi jenis lumpur, yaitu aluminium sulfat dan *Poly Aluminium Chloride* serta bentuk biji kelor (serbuk dan ekstrak) dengan variasi dosis 100, 250, 500, 750, 1000, 2500, dan 5000 mg/L. Parameter uji meliputi kekeruhan, *Total Solids* (TS), *Total Suspended Solids* (TSS), *Sludge Volume Index* (SVI), *Specific Resistance to Filtration* (SRF), serta zeta potensial. Uji *Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX), *Fourier Transform Infra Red* (FTIR), and *Particle Size Distribution* (PSD) digunakan sebagai analisis tambahan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan biji kelor mampu meningkatkan removal kekeruhan hingga 88,26%, menurunkan nilai SVI hingga 4,21%, meningkatkan TS dari 0,4% menjadi 28,2%, serta menurunkan TSS dari 200 mg/L menjadi 50 mg/L jika dibandingkan dengan lumpur tanpa penambahan biji kelor. Penambahan serbuk biji kelor juga menurunkan nilai SRF menjadi 0,019 m/kg untuk lumpur alum dan 0,029 m/kg untuk lumpur PAC, serta menurunkan zeta potensial menjadi $-13,90 \pm 0,41$ mV dan $-3,05 \pm 0,25$ mV yang menunjukkan terbentuknya flok yang lebih besar, padat, dan kompak. Hasil analisis SEM-EDX menunjukkan karakteristik flok lumpur setelah penambahan biji kelor menjadi lebih besar dan rapat, sementara hasil FTIR mengonfirmasi keterlibatan gugus fungsional aktif seperti amina, hidroksil, alifatik, dan alkena dalam proses pengkondisian lumpur. Dosis optimal serbuk biji kelor diperoleh pada lumpur mengandung alum sebesar 100 mg/L dan lumpur PAC sebesar 250 mg/L.

Kata Kunci: *Aluminium Sulfat* (alum), biji kelor, efisiensi *dewatering*, pengkondisian lumpur, *Poly Aluminium Chloride* (PAC).

”Halaman ini sengaja dikosongkan”

ABSTRACT

EFFECT OF ADDING *MORINGA OLEIFERA* SEED ON THE CONDITIONING PROCESS OF SLUDGE CONTAINING ALUMINIUM SULFATE AND POLY ALUMINIUM CHLORIDE (PAC)

Student Name/NRP : Ani Anggraeni / 5014211060
Department : Environmental Engineering FTSPK - ITS
Advisor : Adhi Yuniarto, ST., MT., Ph.D.

Abstract

This study aims to determine the effect of *Moringa oleifera* seed addition, characterize the active compounds of moringa seeds, and identify the optimal dosage of moringa seeds in the sludge conditioning process containing Aluminium Sulfate (alum) and Poly Aluminium Chloride (PAC) to improve dewatering efficiency. The use of chemical coagulants such as alum and PAC has proven effective but is limited by high costs and potential environmental impacts, thus necessitating alternative natural materials that are more environmentally friendly. Moringa seeds contain positively charged proteins that are effective in flocculating suspended particles through mechanisms such as charge neutralization, bridging flocculation, and physical adsorption.

This study utilized variations in sludge types, namely aluminium sulfate (alum) and Poly Aluminium Chloride (PAC), as well as forms of Moringa seeds (powder and extract) with dosage variations of 100, 250, 500, 750, 1000, 2500, and 5000 mg/L. The tested parameters included turbidity, Total Solids (TS), Total Suspended Solids (TSS), Sludge Volume Index (SVI), Specific Resistance to Filtration (SRF), and zeta potential. Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX), Fourier Transform Infrared (FTIR), and Particle Size Distribution (PSD) analyses were conducted as additional characterizations.

The results showed that the addition of Moringa seeds was able to increase turbidity removal up to 88.26%, reduce SVI values by up to 4.21%, increase TS from 0.4% to 28.2%, and reduce TSS from 200 mg/L to 50 mg/L compared to sludge without Moringa seed addition. The addition of Moringa seed powder also reduced SRF values to 0.019 m/kg for alum sludge and 0.029 m/kg for PAC sludge, as well as decreased zeta potential to -13.90 ± 0.41 mV and -3.05 ± 0.25 mV, indicating the formation of larger, denser, and more compact flocs. SEM-EDX analysis showed that the sludge flocs became larger and more compact after Moringa seed addition, while FTIR analysis confirmed the involvement of active functional groups such as amine, hydroxyl, aliphatic, and alkene in the sludge conditioning process. The optimal dosage of Moringa seed powder was found to be 100 mg/L for alum sludge and 250 mg/L for PAC sludge.

Keywords: Aluminium sulfate, dewatering efficiency, *moringa oleifera* seed, Poly Aluminium Chloride (PAC), sludge conditioning.

”Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang, atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul “Pengaruh Penambahan Biji Kelor (*Moringa oleifera*) Pada Proses Pengkondisian Lumpur Mengandung *Aluminium Sulfat* dan *Poly Aluminium Chloride* (PAC)” dengan tepat waktu. terselesaikannya laporan ini tidak lepas dari bimbingan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengungkapkan rasa terima kasih dan apresiasi kepada:

1. Bapak Adhi Yuniarto, ST., MT., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang senantiasa meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, saran, dan dukungan dalam penyelesaian laporan tugas akhir.
2. Prof. Ir. Eddy Setiadi Soedjono, Dipl.SE, M.Sc., Ph.D. dan Bapak Alfian Purnomo, ST., MT., selaku dosen pengarah yang juga memberikan bimbingan, arahan, dan masukan dalam penyusunan laporan tugas akhir.
3. Bapak Direktur Utama, Direktur Teknik, dan Sekretariat PERUMDA Giri Tirta Gresik serta Bapak Tohari, Bapak Huda, dan Operator Lapangan selaku pengarah lapangan di Instalasi Pengolahan Air Minum Legundi Gresik yang telah memberikan kesempatan, bimbingan, dan bantuan kepada penulis dalam melaksanakan penelitian laporan tugas akhir ini.
4. Bapak Direktur Utama, Sekretariat PDAM Surya Sembada Surabaya, Bapak Hery, dan operator lapangan selaku pengarah di Instalasi Pengolahan Air Minum Ngagel 1 Surabaya yang telah memberikan kesempatan, bimbingan, dan bantuan kepada penulis dalam melaksanakan penelitian laporan tugas akhir ini.
5. Kedua orang tua saya, Bapak Anggoro Cahyo dan Ibu Reni Dwi Agustin serta adik yang senantiasa mendengarkan keluh kesah, memberikan dukungan, tenaga, motivasi, pengingat, maupun bantuan dan menemani penulis. Terimakasih atas doa dan curahan kasih sayang yang tak terhingga sampai akhirnya penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
6. Teman-teman Teknik Lingkungan angkatan 2021 (Astral21) yang telah bersama-sama berjuang saling berbagi dukungan dan semangat kepada penulis untuk dapat menyelesaikan laporan tugas akhir.
7. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah banyak membantu demi kelancaran dan keberhasilan penyusunan laporan tugas akhir ini.

Penyusunan laporan tugas akhir ini telah diusahakan semaksimal mungkin oleh penulis. Namun, sebagaimana manusia biasa tentu masih terdapat kekurangan pada penyusunan tulisan ini. Oleh karena itu, penulis berharap adanya kritik dan saran yang dapat disampaikan kepada penulis. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi siapa saja yang membaca tulisan ini di masa yang akan datang.

Surabaya, 18 Juli 2025

Penulis

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Ruang Lingkup Studi.....	3
1.5 Manfaat.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Dasar Teori	5
2.1.1 Lumpur Hasil Pengolahan Air	5
2.1.2 Pengkondisian Lumpur (<i>Sludge Conditioning</i>)	6
2.1.3 Pengelolaan Lumpur	6
2.1.4 Koagulan	6
2.1.4.1 Aluminium Sulfat (Alum)	7
2.1.4.2 <i>Poly Aluminium Chloride</i> (PAC).....	8
2.1.5 Pengadukan	9
2.1.6 Biji Kelor (<i>Moringa oleifera</i>)	10
2.1.7 Mekanisme antara Biji Kelor dan Lumpur mengandung Koagulan	12
2.1.8 Parameter Analisis	13
2.2 Penelitian Terdahulu.....	18
BAB 3 METODE PENELITIAN	21
3.1 Kerangka Penelitian.....	21
3.2 Tahapan Pelaksanaan Penelitian.....	22
3.2.1 Kondisi Eksisting dan Kondisi Ideal.....	22
3.2.2 Ide Penelitian	22
3.2.3 Studi Literatur	22
3.2.4 Persiapan Penelitian	22
3.2.5 Persiapan Alat dan Bahan	23
3.2.6 Penelitian Pendahuluan	25
3.2.7 Penelitian Utama.....	27
3.2.8 Pengumpulan Data Primer	28
3.2.9 Pengumpulan Data Sekunder	29
3.2.10 Analisis Data dan Pembahasan.....	29
3.2.11 Kesimpulan dan Saran	30
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Karakteristik Awal Lumpur	31
4.1.1 Sumber Lumpur Alum	31

4.1.2 Sumber Lumpur PAC	33
4.2 Hasil dan Pembahasan Penambahan Biji Kelor pada Lumpur	35
4.2.1 <i>Sludge Volume Index</i> (SVI)	35
4.2.2 pH dan Suhu	37
4.2.3 Kekeruhan	40
4.2.4 <i>Total Solids</i> (TS)	42
4.2.5 <i>Total Suspended Solids</i> (TSS)	42
4.2.6 <i>Spesific Resistance to Filtration</i> (SRF)	45
4.2.7 <i>Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray</i> (SEM-EDX)	46
4.2.8 <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR)	50
4.2.9 Zeta Potensial	56
4.2.10 <i>Particle Size Distribution</i> (PSD)	60
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	65
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN 1	75
PROSEDUR ANALISIS PARAMETER PENGUJIAN	75
LAMPIRAN 2	79
PERHITUNGAN KEBUTUHAN SERBUK DAN EKSTRAK BIJI KELOR	79
LAMPIRAN 3	81
PROSEDUR PEROLEHAN BIJI KELOR DAN SAMPLING	81
LAMPIRAN 4	83
DOKUMENTASI PENELITIAN	83
LAMPIRAN 5	85
HASIL PENGUJIAN PARAMETER	85
LAMPIRAN 6	149
FORM FTA-03 KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR	149
LAMPIRAN 7	150
KTA-03 FORMULIR RINGKASAN DAN SARAN DOSEN PEMBIMBING SEMINAR KEMAJUAN TUGAS AKHIR	150
LAMPIRAN 8	151
KTA-03 FORMULIR RINGKASAN DAN SARAN DOSEN PENGARAH SEMINAR KEMAJUAN TUGAS AKHIR	151
LAMPIRAN 9	153
UTA-03 FORMULIR PERTANYAAN DAN SARAN DOSEN PEMBIMBING UJIAN LISAN TUGAS AKHIR	153
LAMPIRAN 10	154
UTA-03 FORMULIR PERTANYAAN DAN SARAN DOSEN PENGARAH UJIAN LISAN TUGAS AKHIR	154
BIOGRAFI PENULIS	157

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram Alir Pengelolaan Lumpur Secara Umum	7
Gambar 2.2 Alumunium Sulfate atau Tawas	8
Gambar 2.3 Poly Aluminium Chloride (PAC)	9
Gambar 2.4 Tumbuhan Kelor (<i>Moringa oleifera</i>)	11
Gambar 2.5 Spektrum FTIR pada Gelombang 4000-500 (a) dan 500-4000 cm ⁻¹ (b)	16
Gambar 3.1 Kerangka Penelitian	21
Gambar 3.2 Lokasi Pengambilan Sampel Lumpur Mengandung Alum.....	23
Gambar 3.3 Lokasi Pengambilan Sampel Lumpur Mengandung PAC	23
Gambar 4.1 Proses Pengolahan Air Minum IPAM Legundi Gresik (Lumpur Mengandung Alum).....	31
Gambar 4.2 Injeksi Tawas Cair IPAM Legundi Gresik.....	32
Gambar 4.3 Lumpur Segar IPAM Legundi Gresik.....	32
Gambar 4.4 Proses Pengolahan Air Minum IPAM Ngagel 1 Surabaya (Lumpur Mengandung PAC).....	33
Gambar 4.5 Lumpur Segar IPAM Ngagel 1 Surabaya	34
Gambar 4.6 Hasil Uji SVI pada Lumpur Alum	36
Gambar 4.7 Hasil Uji SVI pada Lumpur PAC	36
Gambar 4.8 Hasil Uji pH pada Lumpur Alum.....	37
Gambar 4.9 Hasil Uji pH pada Lumpur PAC	38
Gambar 4.10 Hasil Uji Suhu pada Lumpur Alum	39
Gambar 4.11 Hasil Uji Suhu pada Lumpur PAC.....	39
Gambar 4.12 Hasil Uji Kekeruhan Lumpur Alum.....	40
Gambar 4.13 Pengamatan Fisik Uji Kekeruhan Lumpur Alum.....	41
Gambar 4.14 Hasil Uji Kekeruhan pada Lumpur PAC	41
Gambar 4.15 Hasil Uji TS pada Lumpur Alum	43
Gambar 4.16 Hasil Uji TS pada Lumpur PAC	43
Gambar 4.17 Hasil Uji TSS pada Lumpur Alum.....	44
Gambar 4.18 Hasil Uji TSS pada Lumpur PAC	44
Gambar 4.19 Hasil Uji SRF pada Lumpur Alum	45
Gambar 4.20 Hasil Uji SRF pada Lumpur PAC.....	46
Gambar 4.21 Hasil Uji SEM Ekstrak Biji Kelor.....	48
Gambar 4.22 Hasil Uji SEM Lumpur Alum	48
Gambar 4.23 Hasil Uji SEM Lumpur PAC	48
Gambar 4.24 Hasil Uji FTIR Sampel Lumpur Alum	51
Gambar 4.25 Hasil Uji FTIR Sampel Lumpur PAC.....	51
Gambar 4.26 Hasil Uji FTIR <i>Moringa oleifera</i> (a) Hasil Penelitian (b) Penelitian Terdahulu	55
Gambar 4.27 Hasil Uji Zeta Potensial pada Lumpur Alum (Variasi Serbuk)	57
Gambar 4.28 Hasil Uji Zeta Potensial pada Lumpur Alum (Variasi Ekstrak)	57
Gambar 4.29 Hasil Uji Zeta Potensial pada Lumpur PAC (Variasi Serbuk).....	58
Gambar 4.30 Hasil Uji Zeta Potensial pada Lumpur PAC (Variasi Ekstrak).....	58
Gambar 4.31 Hasil Uji Zeta Potensial dan Kekeruhan pada Penelitian Terdahulu	59

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai Gradien Kecepatan dan Waktu Pengadukan	10
Tabel 2.2 Berbagai Senyawa Kimia yang Ditemukan dalam Biji <i>Moringa oleifera</i>	11
Tabel 2.3 <i>Single Bond Area</i> (3250-3650 cm ⁻¹)	16
Tabel 2.4 <i>Triple Bond Area</i> (2000-2500 cm ⁻¹).....	17
Tabel 2.5 <i>Double Bond Area</i> (2000-2500 cm ⁻¹).....	17
Tabel 2.6 Kelompok Fungsional pada Puncak FTIR (<1500 cm ⁻¹)	17
Tabel 2.7 Rekap Penelitian Terdahulu	19
Tabel 3.1 Daftar Alat dan Bahan Menurut Parameter.....	25
Tabel 3.2 Percobaan Dosis pada Penelitian Pendahuluan.....	26
Tabel 3.3 Variasi Penelitian	28
Tabel 3.4 Metode Analisis Parameter Penelitian	28
Tabel 4.1 Rata-rata Volume Lumpur yang Dibuang Setiap Bulan (Januari-April 2025) .	34
Tabel 4.2 Perbedaan Lumpur mengandung Alum dan PAC	35
Tabel 4.3 Hasil Uji EDX	49
Tabel 4.4 Gugus Fungsi pada Sampel Lumpur	50

”Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses pengolahan air bersih baik secara konvensional maupun non-konvensional tentunya akan menghasilkan padatan dengan kandungan air tinggi yang disebut lumpur. Karakteristik lumpur bergantung pada karakteristik air baku dan jenis pengolahan yang digunakan. Kuantitas lumpur dapat diketahui dari jumlah penggunaan koagulan kimia pada proses koagulasi dan flokulasi, penurunan kekeruhan (*turbidity*), dan debit air baku. Meningkatnya penggunaan koagulan kimia dapat terjadi karena permintaan kebutuhan air bersih seiring bertambahnya penduduk serta aktivitas manusia. Peningkatan dosis koagulan kimia berpotensi meningkatkan lumpur dari unit produksi (Sucahyo *et al.*, 2018). Pembuangan lumpur hasil pengolahan air bersih sering dijumpai dibuang ke sungai, ditampung di kolam, ataupun diproses secara minim bahkan tidak sama sekali untuk dicampurkan ke tanah sehingga menurunkan estetika dan berdampak pada lingkungan (Crittenden *et al.*, 2012).

Lumpur hasil produksi air bersih perlu dilakukan pengolahan dengan pengkondisian lumpur (*sludge conditioning*) secara kimia sebelum dikeringkan (*sludge dewatering*) untuk memudahkan pemanfaatan lebih lanjut. Pengkondisian lumpur dilakukan untuk meningkatkan efisiensi *sludge dewatering* sehingga dapat mempercepat pengurangan kadar air, meningkatkan stabilitas lumpur, dan mendukung pemanfaatan kembali lumpur yang lebih efisien. Lumpur hasil pengolahan air bersih dapat dimanfaatkan sebagai substrat *constructed wetland* untuk mengolah air limbah, modifikasi tanah pada lahan pertanian non-pangan atau lahan reklamasi, media pot untuk pertumbuhan tanaman, maupun bahan baku pembuatan batu-bata (Gloria, 2022). Tentunya sebagian besar pemanfaatan lumpur tersebut membutuhkan proses pengkondisian sebelum digunakan.

Bahan pengkondisi lumpur secara umum, meliputi *Aluminium Sulfate* (Alum), *Poly Aluminium Chloride* (PAC), Ferri Klorida, kapur, polielektrolit, abu terbang, magnesium karbonat, dan lainnya. Bahan pengkondisi tersebut telah terbukti keefektifannya, namun masih terdapat beberapa kelemahan terkait penggunaannya, antara lain dianggap tidak efektif pada suhu rendah, beberapa bahan pengkondisi kimia menghasilkan lumpur lebih banyak, dan berpotensi mempengaruhi kualitas lingkungan (Tatsi *et al.*, 2003). Bahan kimia pengkondisi lumpur tersebut digunakan pada sistem pengolahan lumpur secara mekanis sehingga biaya yang diperlukan juga semakin mahal. Bahan kimia pengkondisi lumpur seringkali membutuhkan biaya produksi tinggi sehingga dilakukan pencarian bahan alami lokal yang memiliki potensi untuk pengkondisian lumpur (Ademiluyi, 1988).

Moringa oleifera (pohon kelor) termasuk tanaman tropis tidak beracun yang tumbuh di wilayah Asia, India, Afrika, sub-Sahara, dan Amerika Latin (Yin, 2010). Biji kelor mengandung protein bermuatan positif yang larut dalam air dimana bertindak sebagai bahan pengkondisi alami yang efektif dan sangat baik untuk mengolah air dan air limbah (Tat *et al.*, 2010). Selain itu, biji kelor dapat menggumpalkan partikel tersuspensi bermuatan negatif dalam air dan air limbah. Biji kelor juga memiliki polielektrolit kationik yang memberikan kemampuan penyerapan kuat terhadap partikel bermuatan negatif sehingga permukaan partikel dapat dinetralkan (Nand *et al.*, 2012). Biji kelor mengandung zat aktif *4-alfa-4-rhamnosyloxy-benzil-isothiocyanate* yang berperan sebagai koagulan. Zat aktif dapat mengadsorpsi partikel-partikel air menjadi bentuk lebih kecil sehingga zat aktif semakin banyak karena semakin besar luas permukaan biji kelor (Rustiah & Andriani, 2018).

Penelitian yang pernah dilakukan oleh Paula *et al.* (2014), menunjukkan bahwa lebih dari 90% kekeruhan air limbah beton dihilangkan dengan kombinasi biji kelor (*Moringa oleifera*) dan alum dengan perbandingan masing-masing 20:80. Penelitian lainnya menurut Hussain *et*

al. (2012), menunjukkan bahwa penghilangan kekeruhan air dengan koagulan campuran yang terdiri atas biji kelor (*Moringa oleifera*) dan PAC. Dosis optimal pada kekeruhan 95,7% adalah dengan penambahan 30 mg/L PAC dan 300 mg/L biji kelor.

Penelitian berikutnya menunjukkan bahwa pemberian bahan pengkondisi campuran yang terdiri atas biji kelor (*Moringa oleifera*) dan alum dengan perbandingan 50:50 mengalami efisiensi yang sama jika dibandingkan dengan hanya bahan pengkondisi alum pada lumpur sintesis. Dosis dari perbandingan pengkondisi tersebut adalah 117,79 mg/L biji kelor dan 117,79 mg/L alum dimana dosis tersebut sama-sama menghasilkan nilai SRF sebesar $0,8 \times 10^{11}$ m/kg ketika alum digunakan 100% dengan dosis 212,022 mg/L. Penelitian ini juga menggunakan 100% biji kelor dengan dosis 288 mg/L menghasilkan SRF sebesar $1,45 \times 10^{11}$ m/kg (Abdulazeez *et al.*, 2016). Harga jual yang tersedia untuk biji kelor adalah Rp 25.000/kg dan kristal tawas adalah Rp 30.000/kg sehingga untuk dosis 50:50 seharga Rp 6.470 per mg/L, dosis 100% alum seharga Rp 6.360 per mg/L, dan dosis 100% biji kelor seharga Rp 7.250 per mg/L. Selisih harga Rp 840 dapat diminimisasi dengan upaya pemanenan biji kelor secara mandiri dalam jumlah banyak. Upaya penghematan biaya tersebut tentunya juga sangat memberi peluang untuk meminimalisir penggunaan bahan kimia serta mempertahankan efisiensi *dewatering* (Abdulazeez *et al.*, 2016).

Penggunaan biji kelor (*Moringa oleifera*) memiliki potensi untuk dijadikan bahan pengkondisi lumpur yang lebih terjangkau dan ramah lingkungan (Mohammad *et al.*, 2014). Namun, masih sedikit penelitian yang membahas tentang penggunaan biji kelor pada lumpur hasil pengolahan air yang mengandung *Aluminium Sulfat* (Alum) dan *Poly Aluminium Chloride* (PAC) pada proses pengkondisian. Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi penggunaan bahan pengkondisi kimia dalam proses pengkondisian lumpur (*sludge conditioning*) dengan memanfaatkan biji kelor (*Moringa oleifera*). Studi dilakukan untuk menguji adanya pengaruh penambahan biji kelor terhadap parameter uji *Specific Resistance of Filtration* (SRF) pada lumpur hasil pengolahan air yang mengandung *Aluminium Sulfat* (Alum) dan *Poly Aluminium Chloride* (PAC). Penentuan sampel lumpur mengandung alum dan PAC dipilih karena secara umum, instalasi pengolahan air minum di Indonesia menggunakan salah satu maupun kombinasi dua koagulan tersebut dalam proses koagulasi-flokulasi. Penelitian ini hanya menangani residu lumpur karena proses koagulasi-flokulasi sudah terjadi mengingat biji kelor disini berfokus pada efektifitasnya terhadap proses pengkondisian lumpur. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam menciptakan solusi pengelolaan lumpur yang lebih efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, maka dapat dirumuskan masalah penting sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh penambahan biji kelor (*Moringa oleifera*) terhadap proses pengkondisian lumpur yang mengandung *Aluminium Sulfate* (Alum) dan *Poly Aluminium Chloride* (PAC)?
2. Bagaimana karakteristik senyawa aktif dari biji kelor (*Moringa oleifera*) yang berperan dalam pengkondisian lumpur?
3. Berapa dosis optimal biji kelor untuk meningkatkan efisiensi *dewatering* lumpur dalam proses pengkondisian?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan pengaruh penambahan biji kelor (*Moringa oleifera*) terhadap proses pengkondisian lumpur yang mengandung *Aluminium Sulfate* (Alum) dan *Poly Aluminium Chloride* (PAC).
2. Mengkarakterisasi senyawa aktif dari biji kelor (*Moringa oleifera*) yang berperan dalam proses pengkondisian lumpur yang mengandung *Aluminium Sulfate* (Alum) dan *Poly Aluminium Chloride* (PAC).
3. Menentukan dosis optimal biji kelor untuk meningkatkan efisiensi *dewatering* lumpur yang mengandung *Aluminium Sulfate* (Alum) dan *Poly Aluminium Chloride* (PAC).

1.4 Ruang Lingkup Studi

Penelitian ini memiliki ruang lingkup sebagai berikut:

1. Wilayah studi meliputi sampel lumpur yang diperoleh dari *outlet* unit sedimentasi Instalasi Pengolahan Air Minum Legundi Gresik (mengandung alum), *outlet* unit *clearator* IPAM Ngagel Surabaya (mengandung PAC), dan biji kelor yang tersedia.
2. Pengambilan sampel dilakukan pada bulan Maret – Juli 2025 di IPAM Legundi Gresik dan IPAM Ngagel Surabaya. Pada rentang 5 (lima) bulan tersebut, pengambilan sampel dilakukan hanya ketika memerlukan analisis sehingga jumlah sampling dapat menyesuaikan.
3. Parameter lumpur yang dianalisis adalah pH, suhu, kekeruhan, *Total Solids* (TS), *Total Suspended Solids* (TSS), *Specific Resistance to Filtration* (SRF), komposisi unsur permukaan (SEM-EDX), gugus fungsi (FTIR), zeta potensial, dan ukuran flok (PSA).
4. Analisis sampel lumpur dilakukan di Laboratorium Teknik Lingkungan FT-SPK, Laboratorium Teknik Sipil FT-SPK, Laboratorium Kimia FSAD ITS, dan Lembaga Ilmu Hayati, Teknik, dan Rekayasa Universitas Airlangga, Surabaya.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi tentang efisiensi penambahan biji kelor (*Moringa oleifera*) sebagai bahan alami untuk meningkatkan proses pengkondisian lumpur sehingga dapat mendukung proses *dewatering* lumpur.
2. Memberikan informasi mengenai senyawa aktif dalam biji kelor (*Moringa oleifera*) yang berperan dalam mekanisme pengkondisian lumpur.
3. Membantu menentukan dosis optimal biji kelor (*Moringa oleifera*) yang dapat mengoptimalkan penggunaan bahan alami, mengurangi pemborosan, dan meningkatkan efisiensi proses *dewatering* lumpur.

”Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

2.1.1 Lumpur Hasil Pengolahan Air

Suatu instalasi pengolahan air (IPA) tentu akan menghasilkan lumpur (*sludge*) yang berasal dari proses pengolahannya. Volume lumpur yang dihasilkan seiring dengan peningkatan kapasitas produksi dan pengotor yang terkandung di air baku. Lumpur digambarkan sebagai suatu padatan (*solids*) yang dihilangkan pada proses pengolahan air minum maupun air limbah (Julian *et al.*, 2015). Lumpur akhir yang dihasilkan dari proses pengolahan air memiliki kandungan koagulan sehingga berpengaruh terhadap kualitas lingkungan jika dibuang dengan jumlah yang banyak (Irfan, 2007).

Lumpur yang dihasilkan dari Instalasi Pengolahan Air (IPA) konvensional berasal dari (ASCE Manual (1996) dalam Julian *et al.* (2015)):

1. Unit Sedimentasi (Lumpur Koagulan)
Lumpur anorganik mengandung koloid, *suspended solids*, pasir, zat organik, dan metal hidroksida yang terbentuk dari koagulan itu sendiri, misalnya *alum sludges* dan *iron sludges*.
2. Unit Filtrasi (Air Bekas *Backwash Filter*)
Lumpur ini mengandung flok berukuran halus yang tidak dapat dihilangkan di unit sedimentasi dimana flok tersebut terjebak dalam saringan pasir dan terbawa oleh air bekas *backwash filter*.
3. Unit Lainnya
Dapat berasal dari *water softening unit* dan unit netralisasi.

Dari unit-unit tersebut, lumpur akan dilakukan penanganan melalui beragam variasi proses, antara lain (Metcalf & Eddy (2004), Clark *et al.* (1977)):

1. *Conditioning*
Proses penambahan zat kimia yang bertujuan memperbaiki kemampuan pemadatan lumpur.
2. *Thickening*
Proses pemekatan lumpur yang bertujuan mengurangi volume lumpur sebelum diolah pada unit selanjutnya.
3. *Dewatering*
Proses pemekatan lumpur secara lebih lanjut yang bertujuan untuk mengubah lumpur menjadi *cake*.
4. *Drying*
Proses penghilangan air atau pengeringan lumpur lebih lanjut melalui proses pemanasan.
5. *Disposal dan Reuse*
Proses pembuangan lumpur pekat ke tempat pembuangan permanen atau dapat dimanfaatkan untuk reklamasi lahan, pemanfaatan energi, dan keperluan pertanian.

Dalam proses *dewatering* lumpur harus menghilangkan kadar air minimal 80% supaya lumpur dapat ditangani dengan menggunakan *conveyor* atau peralatan mekanik lainnya. Pengolahan lumpur tersebut dapat dikategorikan menjadi:

1. *Dewatering alami*
Menggunakan ketergantungan proses evaporasi alami dan perkolasi (gravitasi), seperti *sand drying bed* dan *lagoon*.
2. *Dewatering mekanik*
Menggunakan peralatan mekanik sehingga proses berlangsung lebih cepat, seperti *vacuum filter*, *pressure filter*, *belt filter press*, dan *centrifuge*.

2.1.2 Pengkondisian Lumpur (*Sludge Conditioning*)

Lumpur hasil pengolahan air maupun air limbah biasanya dilakukan pemrosesan yang disebut dengan *sludge conditioning* (pengkondisian lumpur). Proses tersebut dilakukan dengan penambahan bahan kimia untuk meningkatkan kepekatan lumpur dan memperbaiki sifat lumpur sebelum diproses pada unit *dewatering* (Rahayu *et al.*, 2020). Bahan pengkondisi lumpur secara umum, meliputi *Aluminium Sulfate* (Alum), *Poly Aluminium Chloride* (PAC), ferri klorida, kapur, polielektrolit, abu terbang, magnesium karbonat, dan lainnya (Ademiluyi, 1988). Beberapa faktor yang mempengaruhi pengkondisian lumpur adalah komposisi lumpur, jenis dan konsentrasi koagulan, pH dan suhu, serta waktu dan kecepatan pengadukan. Pengkondisian lumpur biasanya diterapkan pada instalasi pengolahan air dan air limbah, industri minyak dan gas, serta industri pengolahan makanan dan pertanian (Shen *et al.*, 2009).

2.1.3 Pengelolaan Lumpur

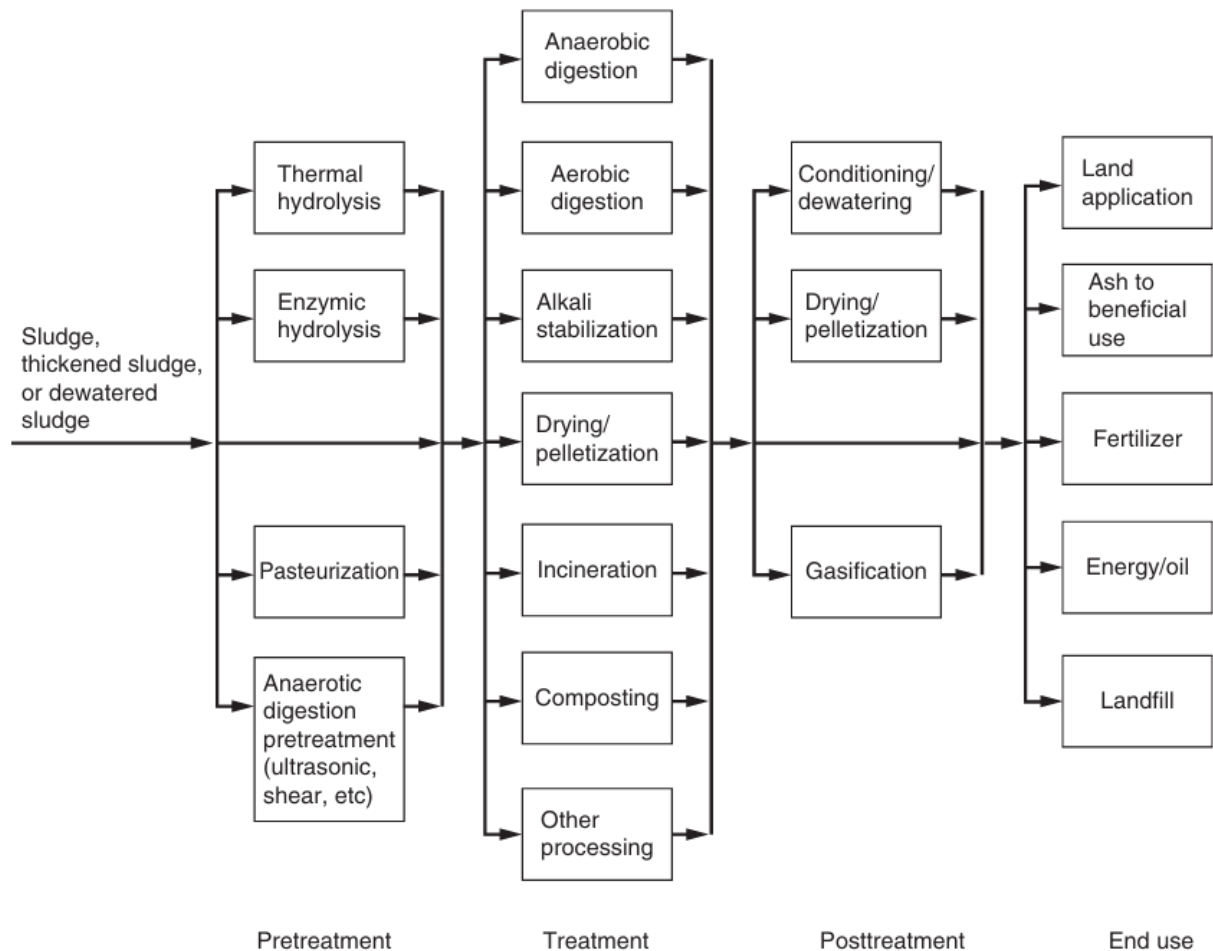
Pengelolaan lumpur merupakan rangkaian proses integrasi yang bertujuan untuk menangani lumpur yang dihasilkan dari instalasi pengolahan air, baik untuk mengurangi volumenya, menstabilkan sifat-sifat kimianya, maupun mempersiapkannya untuk pemanfaatan ulang atau pembuangan akhir yang ramah lingkungan. Secara umum, tahapan pengelolaan lumpur dibagi menjadi empat fase utama, yaitu *pretreatment*, *treatment*, *posttreatment*, dan *end use* yang disajikan pada **Gambar 2.1** (Metcalf & Eddy, 2014).

Pada **Gambar 2.1** menyajikan diagram alir umum yang mencakup berbagai kombinasi proses yang mungkin dilakukan, tergantung pada kondisi dan kebutuhan. Diagram umum pengelolaan lumpur dimulai dari lumpur hasil pengolahan, lumpur yang telah ditebalkan, atau lumpur yang telah *didewatering*. Tahap *pretreatment* mencakup proses-proses awal seperti *thermal hydrolysis*, *enzymic hydrolysis*, atau *pasteurisasi* yang bertujuan untuk mengubah struktur lumpur sebelum stabilisasi lebih lanjut. Tahap berikutnya adalah *treatment*, yang mencakup proses stabilisasi lumpur menggunakan pendekatan biologis, seperti *anaerobic* atau *aerobic digestion*, maupun secara kimiawi seperti *alkali stabilization*. Setelahnya, lumpur dapat dikeringkan (*dewatered*) menggunakan berbagai metode yang tersedia. Pemilihan metode *dewatering* bergantung pada evaluasi ekonomi, kebutuhan pemanfaatan lumpur, dan kondisi lokal.

Setelah proses *treatment*, lumpur biasanya masuk ke tahap *posttreatment* yang terdiri dari *conditionin/dewatering*, pengeringan (*drying*), dan *gasification*. Pada tahap inilah penelitian ini berkontribusi, yaitu dengan mengevaluasi efektivitas biji kelor (*Moringa oleifera*) sebagai bahan pengkondisi alami untuk meningkatkan efisiensi proses *dewatering*. Biji kelor ditambahkan untuk memperbaiki sifat pengendapan dan penyaringan lumpur yang mengandung koagulan *Poly Aluminium Chloride* (PAC) dan Aluminium Sulfat (Alum). Penambahan ini bertujuan untuk menurunkan nilai *Specific Resistance to Filtration* (SRF) dan meningkatkan kualitas hasil *dewatering* sehingga lumpur lebih mudah ditangani pada tahap berikutnya. Tahap terakhir dari pengelolaan lumpur adalah *end use*, yaitu pemanfaatan atau pembuangan lumpur setelah proses pengolahan. Hasil dari proses *dewatering* dapat digunakan untuk reklamasi lahan, bahan bakar energi, pupuk, atau langsung dibuang ke *landfill*, tergantung pada kandungan dan kualitas lumpur akhir.

2.1.4 Koagulan

Koagulan dapat berupa garam logam anorganik atau polimer organik. Polimer merupakan senyawa organik sintetis yang memiliki rantai panjang molekul kecil dengan jenis muatan kationik (positif), anionik (negatif), atau netral (nonionik).



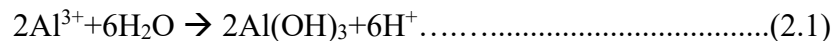
Gambar 2.1 Diagram Alir Pengelolaan Lumpur Secara Umum
(Sumber: Metcalf & Eddy, 2014)

Koagulan organik umumnya tidak mempengaruhi nilai alkalinitas atau pH pada air. Sementara koagulan anorganik terdiri atas senyawa kimia berbasis aluminium atau besi sehingga jika ditambahkan air, koagulan tersebut cenderung menurunkan alkalinitas air menyebabkan turunnya nilai pH. Penggunaan koagulan anorganik dapat meningkatkan konsentrasi padatan terlarut dalam air yang diolah. Koagulan organik, antara lain poliDADMAC, poliakrilamida, Epi-DMA, dan tumbuhan. Sementara koagulan anorganik, antara lain aluminium sulfat (tawas), *Poly Aluminium Chloride* (PAC), ferro sulfat, ferri klorida, dan ferri sulfat (Kusuma, 2019).

2.1.4.1 Aluminium Sulfat (Alum)

Senyawa Kimia Aluminium Sulfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) atau tawas merupakan koagulan kimia yang dikenal pada awal tahun 2000 SM oleh bangsa Mesir. Koagulan tersebut sudah banyak digunakan karena harganya terjangkau, mudah didapatkan, serta penyimpanan mudah (Budi, 2006). Alum dapat digunakan sebagai bahan kimia koagulan pada proses koagulasi-flokulasi maupun pengkondisian lumpur. Alum memiliki muatan positif yang berperan untuk menstabilkan koloid bermuatan negatif. Ketika proses koagulasi menggunakan alum pada air, terjadi proses hidrolisis sehingga terbentuk aluminium hidroksida yang berperan mengikat pencemar pada air. Di dalam proses tersebut, alum akan mengalami netralisasi muatan menjadi aluminium hidroksida netral sehingga koloid membentuk flok dan mengendap menjadi

hidroksida terpresipitasi (Ahmad *et al.*, 2016a). Proses koagulasi menggunakan alum dapat bekerja pada pH antara 5,5 – 8 (Vies and Hammer 1993 dalam Wahyuddin, 2001). Endapan flok tersebut selanjutnya akan menghasilkan lumpur alum apabila dosis alum yang digunakan sesuai. Apabila dosis alum terlalu rendah, maka tidak akan terbentuk flok karena masih adanya ion-ion negatif dari pencemar yang belum terikat dengan ion positif oleh koagulan. Sebaliknya, apabila dosis alum terlalu tinggi, maka air yang terbentuk akan menjadi keruh akibat kotoran dari koagulan (Qomaruddin *et al.*, 2013). Persamaan reaksi hidrolisis yang terjadi antara tawas dan air sebagai berikut.



Reaksi hidrolisis tawas dalam air melepaskan ion H^+ sebanyak 6H^+ sehingga pH air akan bersifat lebih asam (Budiman *et al.*, 2008).

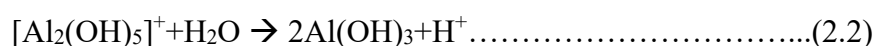
Sifat fisik dan kimiawi dari lumpur alum dapat diketahui berdasarkan kualitas air baku, kemurnian koagulan alum, serta beberapa zat kimia yang ditambahkan pada pengolahan dalam produksi air bersih. Lumpur alum memiliki struktur berbentuk gelatin amorf yang mengandung zat organik tersuspensi, zat anorganik, mikroorganisme, koagulan, dan zat kimia (Zhao *et al.*, 2011).



Gambar 2.2 Alumunium Sulfate atau Tawas
(Sumber: Website Tricakra Chlorine System)

2.1.4.2 Poly Aluminium Chloride (PAC)

Poly Aluminium Chloride memiliki rumus umum kimia $\text{Al}_2(\text{OH})_{6-n}\text{Cl}_n \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ($n=1-5$). Hasil polimerisasi kondensasi dari garam alumunium membentuk PAC yang berbentuk cair. PAC memiliki daya koagulasi lebih besar dibandingkan dengan alum dan mampu menghasilkan flok yang stabil walaupun pada suhu rendah sehingga PAC termasuk koagulan yang sangat baik. PAC dapat digunakan sebagai bahan kimia koagulan pada proses koagulasi-flokulasi maupun pengkondisian lumpur. Kandungan basa pada PAC yang cukup akan menambah gugus hidroksil dalam air sehingga penurunan pH tidak terlalu signifikan. Adapun reaksi hidrolisis yang terjadi antara PAC dan air sebagai berikut.



Pada persamaan 2.2 menunjukkan bahwa reaksi hidrolisis PAC dalam air hanya melepaskan 1 buah ion H^+ sehingga penurunan pH tidak terlalu tajam (Budiman *et al.*, 2008).

Keunggulan yang dimiliki oleh koagulan PAC dibandingkan koagulan lainnya adalah PAC dapat bekerja pada rentang pH yang luas, PAC tidak menyebabkan kekeruhan air

walaupun dosis yang ditambahkan berlebih, PAC mengandung polimer khusus dengan struktur polielektrolit yang tidak memerlukan penggunaan koagulan tambahan. Hal tersebut sekaligus menjadi upaya penghematan dalam penggunaan bahan untuk koagulasi (Alaerts & Santika, 1984). Selain itu, PAC termasuk koagulan bebas sulfat sehingga aman bagi lingkungan dan manusia serta mudah dalam penyimpanan (Husnah, 2016).



Gambar 2.3 *Poly Aluminium Chloride (PAC)*
(Sumber: Website Baidu)

2.1.5 Pengadukan

Parameter penting dalam pengadukan adalah kecepatan pengadukan yang dinyatakan dengan gradien kecepatan (G). Gradien kecepatan (G) dipengaruhi oleh besarnya energi yang diberikan (P). Adapun persamaan umum untuk semua jenis pengadukan adalah sebagai berikut:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dengan :

- P = Suplai tenaga ke air (N.m/detik)
- V = Volume air yang diasuk (m^3)
- μ = Viskositas absolut air (N.detik/ m^3)

Persamaan 2.3 berlaku untuk semua jenis pengadukan, namun parameter yang membedakan terletak pada besar tenaga yang disuplai ke dalam air (P). Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai P bergantung pada metoda pengadukan yang digunakan (Masduqi & Assomadi, 2019).

Pengadukan dapat dilakukan secara mekanis, hidrolis, dan pneumatis. Secara umum, pada pengujian menggunakan *jar test* skala laboratorium menggunakan pengadukan mekanis dimana menggunakan peralatan mekanis yang terdiri atas motor, poros pengaduk (*shaft*), dan alat pengaduk (*impeller*) yang digerakkan menggunakan tenaga listrik. Tipe *impeller* skala laboratorium banyak digunakan jenis *paddle* dengan kecepatan putaran 20-150 rpm dan memiliki diameter 50-80% dari lebar bak dimana lebar bak 1/6-1/10 diameter *paddle*.

Dalam perancangan alat pengaduk mekanis, faktor yang penting diperhatikan adalah G dan t_d . Nilai G mempengaruhi t_d dimana semakin besar nilai G , maka semakin pendek pula waktu yang diperlukan. Guna menyatakan G dan t_d , digunakan bilangan Camp yang merupakan hasil perkalian gradien kecepatan dengan waktu pengadukan (Masduqi & Assomadi, 2019). Pemilihan nilai G dan t_d dapat menggunakan patokan **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1 Nilai Gradien Kecepatan dan Waktu Pengadukan

Waktu Pengadukan, t_a (detik)	Gradien Kecepatan, G (1/detik)
20	1000
30	900
40	790
$50 \geq$	700

(Sumber: Reynold & Richards, 1996 dalam Masduqi & Assomadi, 2019)

Pengadukan mekanis, bentuk dan ukuran alat pengaduk serta kecepatan putaran pengaduk berperan untuk menghasilkan tenaga. Hubungan variabel-variabel tersebut dinyatakan pada persamaan 2.4 untuk bilangan Reynold (N_{Re}) lebih dari 10.000 dan persamaan 2.5 untuk N_{Re} kurang dari 20. Nilai Bilangan Reynold pada alat pengaduk dihitung menggunakan persamaan 2.6 (Masduqi & Assomadi, 2019).

$$P = K_T \cdot n^3 \cdot D_i^5 \cdot \rho \dots \dots \dots (2.4)$$

$$P = K_L \cdot n^2 \cdot D_i^3 \cdot \mu \dots \dots \dots (2.5)$$

$$N_{Re} = \frac{D_i^2 n \rho}{\mu} \dots \dots \dots (2.6)$$

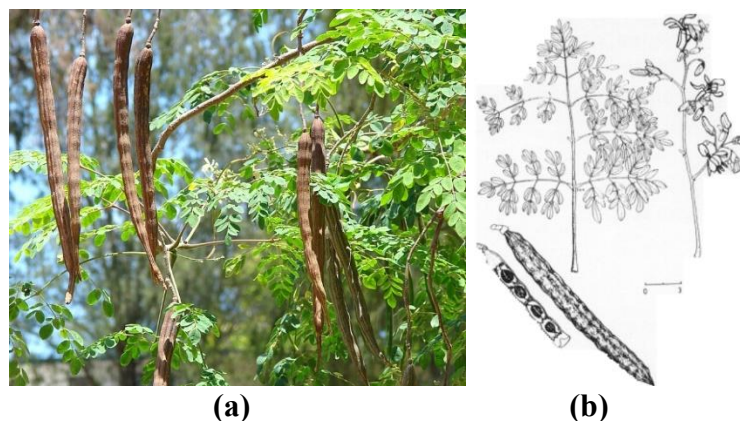
Dengan:

- P = Suplai tenaga ke air (N.m/detik)
- K_T = Konstanta pengaduk untuk aliran turbulen
- n = Kecepatan putaran (rps)
- D_i = Diameter pengaduk (m)
- ρ = Massa jenis air (kg/m^3)
- K_L = Konstanta pengaduk untuk aliran laminar
- μ = Kekentalan absolut cairan (N.detik/m^2)

2.1.6 Biji Kelor (*Moringa oleifera*)

Kelor (*Moringa oleifera*) merupakan tumbuhan yang tumbuh di iklim tropis, seperti Asia, India, Afrika, sub-Sahara, dan Amerika Latin dengan kondisi panas, lembab kering, dan subur. Daunnya berukuran seperti ujung jari berbentuk bulat telur yang tersusun majemuk (Munar, 2022). *Moringa oleifera* memiliki tajuk terbuka berbentuk payung, batang lurus (tebal 10-30 cm) dengan kulit berwarna keputihan seperti gabus. Tumbuhan ini memiliki anak daun berdiameter 1-2 cm, buangnya berwarna putih atau krem. Biji kelor awalnya berwarna hijau muda, ramping dan lembut, lalu menjadi hijau tua, keras, dan panjangnya mencapai 120 cm tergantung pada varietasnya. Biji yang telah matang dan kering berbentuk bulat segitiga, dikelilingi oleh kulit yang sedikit berkayu dengan tida sayap seperti kertas. Biji tersebut cenderung berakar dalam dan berbatang tunggal (Schwarz, 2000). Tumbuhan ini termasuk dalam famili *Moringaceae*, yaitu satu famili perdu dengan 14 spesies yang diketahui (Bhatia *et al.*, 2007). Biji kelor dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Munar, 2022) :

- Kingdom = *Plantae* (Tumbuhan)
- Division = *Spermatophyta*
- Subdivision = *Angiospermae*
- Class = *Dicotyledone*
- Subclass = *Dialypetalae*
- Ordo = *Rheoadales* (*Brassicales*)
- Famili = *Moringaceae*
- Genus = *Moringa*
- Spesies = *Moringa oleifera*



Gambar 2.4 Tumbuhan Kelor (*Moringa oleifera*)
(Sumber: (a) *Website Ciri-ciri Pohon* (b) Schwarz, 2020)

Sifat pengkondisi alami ditemukan pada 6 spesies *Moringa* yang berbeda melalui penelitian laboratorium. Biji kelor mengandung sejumlah besar protein berbobot molekul rendah larut dalam air yang bermuatan positif. Biji kelor yang dihancurkan ditambahkan ke air, protein menghasilkan muatan positif yang bertindak seperti magnet dan menarik partikel bermuatan negatif (seperti tanah liat, sutra, bakteri, dan partikel beracun lainnya dalam air). Proses pembentukan flok terjadi ketika protein mengikat muatan negatif yang membentuk flok melalui agregasi partikel yang ada dalam air. Flok tersebut dapat dihilangkan dengan pengendapan atau penyaringan. Biji kelor tidak hanya dapat menjernihkan air berlumpur yang sangat keruh, tetapi juga air dengan kekeruhan sedang dan rendah (Schwarz, 2000). Flok yang terbentuk dari bahan alami seperti biji kelor lebih kuat terhadap gesekan ketika terjadi aliran turbulen dibandingkan dengan bahan kimia (Setyawati *et al.*, 2017).

Biji tanaman ini mengandung senyawa kimia seperti pada **Tabel 2.2**. Biji kelor mengandung peptida aktif, memiliki pH isoelektrik lebih besar dari 10, dan memiliki berat molekul 6-20 kDa. Efektivitas biji kelor sebagai koagulan dapat dipengaruhi oleh dosis flokulan, pH, dan kualitas biji kelor (Hutasoit *et al.*, 2020). Larutan 5% biji kelor tanpa kulit memiliki nilai zeta potensial sekitar +6 mV dimana menandakan dominasi muatan positif. Penambahan biji kelor yang mengandung protein kationik tersebut dapat menetralkan muatan negatif partikel koloid (Ndabingensere *et al.*, 1995). Dengan demikian, kinerja dari biji kelor sama seperti bahan pengkondisi kimia lumpur yang bertindak sebagai agen positif untuk menarik partikel bermuatan negatif dalam air. Penelitian telah dilakukan untuk menentukan potensi risiko yang terkait dengan penggunaan biji kelor dalam pengolahan air. Hingga saat ini, tidak terdapat bukti yang menunjukkan bahwa biji kelor menyebabkan efek sekunder pada manusia, terutama pada dosis rendah yang diperlukan untuk pengolahan air (Schwarz, 2000).

Tabel 2.2 Berbagai Senyawa Kimia yang Ditemukan dalam Biji *Moringa oleifera*

	<i>Chemical</i>
2,4-Methylene-Cholesterol	4-(Alpha-L-Rhamnosyloxy)-Benzylglucosinolate
Beta-Carotene	28-Isoavenasterol
Campestanol	Alpha-Tocopherol
Ash	4-(Alpha-L-Rhamnosyloxy)-Benzylisothiocyanate
Brassicastanol	Behenic-Acid
Carbohydrates	Beta-Sitosterol
Fat	Cholesterol
Glucosinolates	Fiber

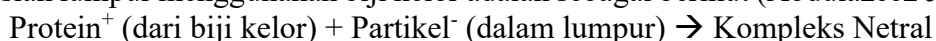
Palmitic-Acid	Oleic-Acid
Stearic-Acid	Protein
Arachidic-Acid	

(Sumber: Sulaiman *et al.*, 2019)

2.1.7 Mekanisme antara Biji Kelor dan Lumpur mengandung Koagulan

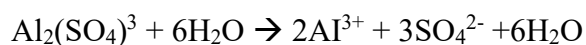
Mekanisme interaksi antara biji kelor (*Moringa oleifera*) dan lumpur yang mengandung koagulan, seperti Alumunium Sulfat dan *Poly Alumunium Chloride* (PAC). Pemahaman mekanisme ini sangat penting untuk menjelaskan bagaimana biji kelor dapat berfungsi sebagai bahan pengkondisi alami dalam proses pengolahan lumpur. Biji kelor diketahui mengandung protein bermuatan positif yang mampu menetralkan partikel bermuatan negatif dalam lumpur sehingga memperbesar pembentukan flok yang dapat dipisahkan lebih efektif selama proses penyaringan lumpur. Flok yang terbentuk dengan baik memiliki struktur lebih kuat memungkinkan air dapat terlepas lebih mudah selama proses *dewatering*. Hal tersebut akan menghasilkan nilai *Specific Resistance to Filtration* (SRF) yang lebih rendah menunjukkan bahwa air dapat disaring lebih cepat dan efisien.

Protein kationik pada biji kelor bereaksi dengan partikel lumpur bermuatan negatif melalui netralisasi muatan partikel koloid dan pembentukan jembatan antara partikel melalui mekanisme *bridging* (molekul biji kelor menghubungkan partikel kecil atau flok yang telah terbentuk sehingga membuat lebih besar dan stabil). Adapun proses kimia yang terjadi pada pengkondisian lumpur menggunakan biji kelor adalah sebagai berikut (Abdulazeez *et al.*, 2016)



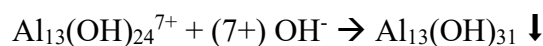
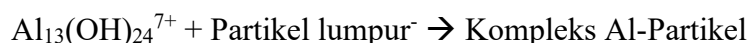
Sebelum menuju pengkondisian, terjadi penambahan koagulan pada proses koagulasi-flokulasi membentuk reaksi kimia berikut.

Aluminium Sulfat



Alumunium sulfat bereaksi dengan air menghasilkan ion alumunium bermuatan tiga positif dan ion sulfat bermuatan dua negatif. Ion alumunium bereaksi dengan molekul air membentuk alumunium hidroksida yang mengendap dan menghasilkan ion hidrogen.

Poly Alumunium Chloride (PAC)



Spesies polimerik alumunium bermuatan positif bereaksi dengan partikel lumpur bermuatan negatif membentuk kompleks alumunium-partikel. Spesies polimerik alumunium bermuatan positif bereaksi dengan ion hidroksida menghasilkan endapan alumunium hidroksida polimerik.

Setelah proses koagulasi-flokulasi, bagian outlet sedimentasi berupa lumpur diambil untuk proses pengkondisian. Akan terjadi reaksi sinergis antara protein kationik biji kelor dan lumpur yang telah mengandung koagulan pada proses pengkondisian lumpur.

Lumpur mengandung Alumunium Sulfat



Protein bermuatan positif dari biji kelor bereaksi dengan aluminium hidroksida membentuk kompleks pembentukan flok yang lebih kuat.

Lumpur mengandung PAC

$\text{Protein}^+ + \text{Spesies Al Polimerik}^+ + \text{Partikel lumpur}^- \rightarrow \text{Kompleks pembentukan flok lebih kuat}$

Protein bermuatan positif dari biji kelor bereaksi dengan spesies aluminium polimerik bermuatan positif dan partikel lumpur bermuatan negatif membentuk kompleks pembentukan flok lebih kuat.

Jumlah ion positif dan ion negatif harus seimbang atau cukup kuat supaya terjadi netralisasi muatan negatif dari partikel. Proses netralisasi akan sulit terjadi jika konsentrasi ion positif terlalu rendah. Ion positif dan ion negatif akan terbentuk medan elektrostatis dikarenakan perbedaan konsentrasi. Potensial listrik dari medan elektrostatis terdapat dalam bidang geser sekitar partikel. Potensial listrik itulah yang disebut dengan zeta potensial atau gaya tolak menolak antar partikel koloid (Anggarani, 2015).

2.1.8 Parameter Analisis

Penelitian ini menggunakan beberapa parameter uji, seperti pH, kekeruhan, suhu, zeta potensial, *Total Solids* (TS), *Total Suspended Solids* (TSS), dan *Specific Resistance to Filtration* (SRF). Penjelasan dari parameter uji disajikan sebagai berikut:

2.1.8.1 pH

Potensi hidrogen (pH) dapat didefinisikan sebagai ukuran konsentrasi ion hidrogen dalam larutan yang menunjukkan tingkat keasaman atau kebasaan larutan. Pengukuran pH bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik larutan uji. Larutan dengan pH rendah disebut asam, sedangkan larutan dengan pH tinggi disebut basa. Skala pH berkisar dari 0 (asam kuat) hingga 14 (basa kuat), dengan pH 7 yang menggambarkan larutan netral, seperti air murni. Nilai pH sering digunakan untuk menentukan tingkat keasaman suatu larutan. Semakin rendah nilai pH, maka semakin tinggi tingkat keasamannya. Sebaliknya, jika semakin tinggi nilai pH, maka semakin rendah tingkat keasamannya (Aminah *et al.*, 2016).

2.1.8.2 Suhu

Salah satu parameter fisik yang penting dalam proses pengolahan lumpur adalah suhu dikarenakan dapat mempengaruhi beragam sifat fisik dan kimia lumpur. Suhu berhubungan langsung dengan kecepatan reaksi kimia, kelarutan gas, viskositas, dan kestabilan mikroorganisme yang ada di dalam lumpur. Dalam pengolahan lumpur, perubahan suhu dapat digunakan untuk mempercepat proses pengendapan, *dewatering*, atau destabilisasi lumpur (Miller *et al.*, 2007). Suhu mempengaruhi laju pengendapan lumpur dimana semakin tinggi suhu, maka partikel-partikel dalam lumpur akan bergerak lebih cepat sehingga mempercepat proses pengendapan. Beberapa faktor yang mempengaruhi suhu pada lumpur, yaitu jenis lumpur, suhu operasional, dan durasi pemberian suhu (Gonzales *et al.*, 2008).

2.1.8.3 Kekeruhan

Salah satu parameter fisik air yang menyebabkan transparansi atau daya tembus cahaya pada air berkurang adalah kekeruhan. Kekeruhan dapat ditandai dengan adanya partikel koloid maupun tersuspensi yang menyerap cahaya yang seharusnya diteruskan karena intensitas cahaya menjadi diserap oleh partikel yang disebut absorpsi. Absorpsi biasanya dinyatakan dalam satuan NTU atau *Nephelometric Turbidity Unit* yang dapat diukur menggunakan alat turbidimeter (Masduki & Assomadi, 2019).

2.1.8.4 Zeta Potensial

Zeta potensial (ζ) merupakan reaksi mikroskopik dari sifat permukaan partikel air yang dihasilkan oleh adanya lapisan listrik yang terbentuk antara permukaan partikel dan medium di sekitarnya (Makmur *et al.*, 2024). Nilai zeta potensial dapat diturunkan dengan menambahkan ion yang bermuatan berlawanan. Penambahan ion ini akan mengurangi perbedaan muatan antar partikel, menipiskan lapisan ganda listrik sehingga akan menurunkan nilai zeta potensial (Susanto, 2008). Zeta potensial menjadi parameter penting untuk koloid atau partikel nano dalam suspensi. Nilai zeta potensial memiliki hubungan yang erat dengan stabilitas suspensi maupun morfologi permukaan partikel (Faza *et al.*, 2017).

2.1.8.5 Total Solid (TS)

Total Solid (TS) digambarkan sebagai substrat kering yang dinyatakan dengan persentase berat total. Guna mengetahui TS bahan organik, jumlah substrat ditimbang dan dikeringkan pada suhu 105°C hingga kandungan airnya nol, lalu berat setelah pengeringan dibagi dengan berat aslinya. Jika nilai TS meningkat, maka volume air mengalami penurunan yang mengakibatkan aktivitas mikroba menurun (Orhorhoro *et al.*, 2017). Prinsip kerjanya adalah sampel uji yang telah homogen diupkan hingga kistat, lalu dikeringkan pada suhu 105°C hingga berat tetap. Adapun perhitungan padatan total disajikan pada persamaan berikut.

$$\text{Padatan total (mg/l)} = \frac{(W_1 - W_0)}{V} \times 1000 \dots \dots \dots (2.7)$$

Dengan :

W₀ = Berat tetap cawan kosong setelah pemanasan 105°C (mg)

W₁ = Berat tetap cawan berisi padatan terlarut total setelah pemanasan 105°C (mg)

V = Volume contoh uji (ml)

1000 = Konversi dari mililiter ke liter

2.1.8.6 Total Suspended Solids (TSS)

Total Suspended Solid (TSS) didefinisikan sebagai padatan yang terdapat pada larutan, namun tidak larut. TSS dapat menyebabkan kekeruhan karena tidak langsung mengendap pada dasar larutan. Beberapa contoh TSS, yakni lumpur, tanah liat, logam oksida, sulfida, ganggang, bakteri, dan jamur (Rosarina & Laksanawati, 2018). Apabila waktu pengendapan lama, maka kadar TSS yang dapat diendapkan juga semakin besar. Hal tersebut terjadi karena protein kationik yang bermuatan positif akan tertarik oleh partikel koloid bermuatan negatif seperti lumpur, bakteri, dan partikel lainnya (Hak *et al.*, 2018).

Prinsip kerjanya adalah sampel uji yang sudah homogen disaring dengan kertas saring yang telah sebelumnya telah ditimbang. Residu yang tertahan pada kertas saring lalu dikeringkan hingga mencapai berat tetap pada suhu 105°C. Penambahan berat pada kertas saring menunjukkan jumlah padatan tersuspensi total. Jika padatan tersuspensi menghambat proses penyaringan dan memperlambatnya, diameter pori kertas saring dapat diperbesar atau volume sampel uji dapat dikurangi. Guna memperoleh perkiraan TSS, dapat dihitung selisih antara total padatan terlarut (TDS) dan total padatan (TS). Perhitungan disajikan pada persamaan berikut.

$$\text{TSS (mg/l)} = \frac{(A - B)}{V} \times 1000 \dots \dots \dots (2.8)$$

Dengan :

A = Berat kertas saring dan residu kering (mg)

B = Berat kertas saring (mg)

V = Volume contoh uji (ml)

2.1.8.7 *Specific Resistance to Filtration (SRF)*

SRF didefinisikan sebagai besarnya resistensi yang diberikan oleh padatan yang terbentuk pada media filtrasi terhadap aliran cairan per satuan luas. Parameter ini dihitung berdasarkan data eksperimen filtrasi tekanan atau vakum menggunakan persamaan Darcy dimana menghubungkan tekanan, laju alir, dan karakteristik media filtrasi (Eckenfelder, 2000). Beberapa faktor yang mempengaruhi SRF adalah komposisi lumpur, ukuran partikel, penggunaan koagulan dan flokulan, serta tekanan dan waktu filtrasi (Chuang *et al.*, 1997).

Nilai SRF untuk setiap lumpur yang dikondisikan ditentukan dengan memplot waktu filtrasi yang telah berlalu per volume filtrat (t/V) dengan volume filtrat yang dikoreksi pada tekanan vakum yang ditentukan (Persamaan 2.9). Kemiringan garis adalah konstanta b yang digunakan untuk menghitung nilai *Specific Resistance to Filtration* (Ozacar & Sengil, 2000).

$$r = \frac{2PA^2b}{\mu W} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dengan :

- b = Kemiringan t/V (s/m^6)
- P = Tekanan filtrasi (N/m^2)
- μ = Viskositas ($N s/m^2$)
- W = Densitas padatan kering (kg/m^3)
- r = Specific resistance to filtration (m/kg)
- A = Area of the filter paper (m^2)

2.1.8.8 *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX)*

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan teknik mikroskopi elektron yang digunakan secara luas untuk menganalisis permukaan dan struktur mikro material baik organik maupun anorganik. SEM bekerja dengan memanfaatkan interaksi antara berkas elektron berenergi tinggi dengan permukaan sampel untuk menghasilkan citra topografi serta informasi komposisi kimia. Pada saat berkas elektron mengenai permukaan sampel, berbagai sinyal dihasilkan, seperti elektron sekunder (*secondary electrons/SE*), elektron terpental balik (*backscattered electrons/BSE*), dan sinar-X karakteristik yang digunakan dalam analisis *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX atau EDS) (Musalib *et al.*, 2017). SE terutama digunakan untuk menggambarkan topografi permukaan dengan resolusi tinggi, sementara BSE memberikan informasi tentang kontras komposisi berdasarkan perbedaan bilangan atom. Adapun sinar-X karakteristik memungkinkan analisis unsur penyusun sampel secara kualitatif dan semi-kuantitatif ketika dikombinasikan dengan sistem EDX (Inkson, 2016). Secara struktural, SEM terdiri dari beberapa komponen utama seperti *electron gun* sebagai sumber elektron, sistem lensa elektromagnetik untuk memfokuskan berkas elektron, koil defleksi, detektor SE dan BSE, ruang vakum tempat sampel diletakkan, serta sistem komputer untuk pemrosesan dan tampilan gambar (Mohammed & Abdullah, 2018).

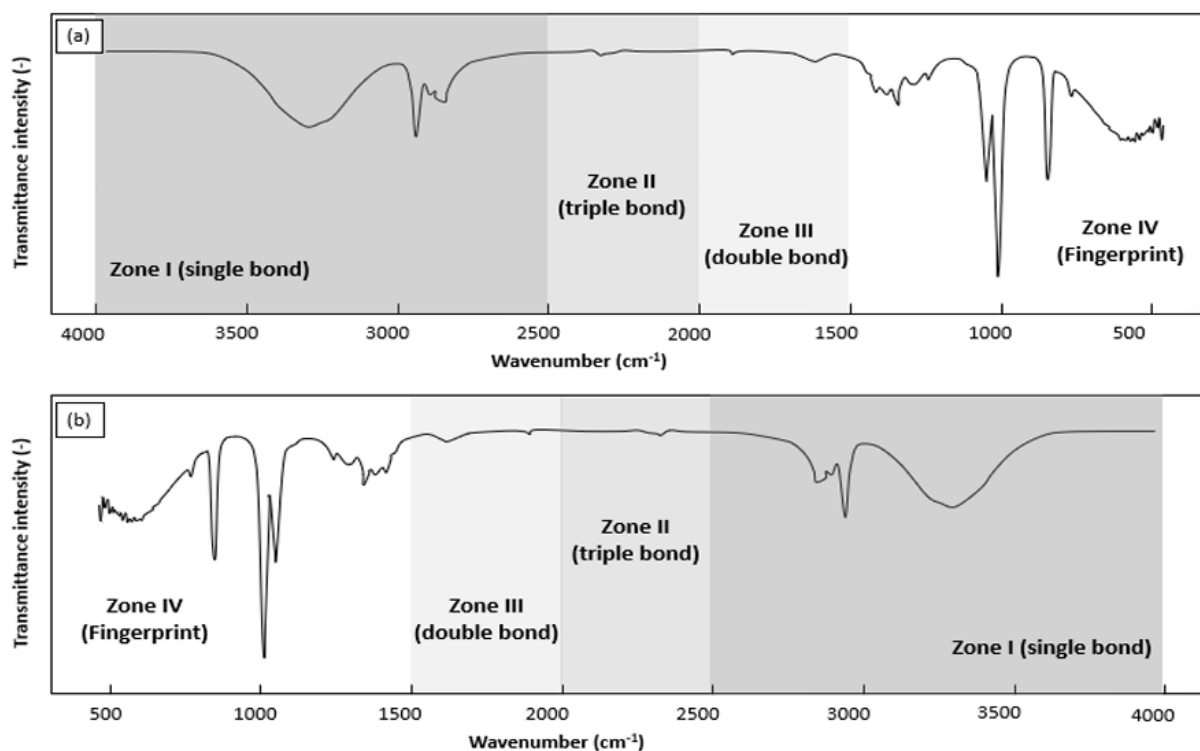
2.1.8.9 *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) merupakan salah satu teknik spektroskopi yang digunakan secara luas untuk mengidentifikasi dan menganalisis gugus fungsi kimia dalam suatu bahan, baik organik maupun anorganik. Dalam konteks pengolahan air limbah dan lumpur, FTIR digunakan untuk mengevaluasi perubahan struktur kimia dan keberadaan gugus aktif yang berperan dalam proses koagulasi, flokulasi, serta stabilisasi lumpur. Teknik ini bekerja berdasarkan prinsip penyerapan radiasi inframerah oleh molekul

yang menyebabkan vibrasi spesifik antar ikatan atom, menghasilkan spektrum unik yang mencerminkan komposisi kimia material yang dianalisis (Liu, 2013)

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) telah menjadi metode analisis yang sangat penting dalam berbagai bidang, terutama dalam aplikasi pada sistem biologis seperti makanan dan bahan organik. Teknik ini terbukti sangat efektif untuk melakukan analisis kuantitatif terhadap komponen utama seperti lemak, protein, dan karbohidrat. Absorbansi dari pita-pita spektral seperti gugus karbonil (C=O), gugus amida (–CONH–), dan gugus hidroksil (–OH) menjadi indikator kunci untuk mengidentifikasi kandungan dan perubahan komposisi kimia (Voort, 1992). Dalam penelitian yang melibatkan bahan alami seperti biji kelor (*Moringa oleifera*), FTIR sangat penting untuk mengidentifikasi gugus fungsi aktif seperti karboksilat (–COOH), hidroksil (–OH), dan amina (–NH₂) yang memiliki peran dalam menetralkan muatan koloid dan membentuk jembatan flokulasi (Amir *et al.*, 2013).

Dalam mendukung proses identifikasi FTIR secara sistematis dan akurat, diperlukan pemahaman yang mendalam mengenai database spektrum FTIR. Spektrum FTIR dibagi menjadi beberapa zona berdasarkan rentang bilangan gelombang (*wavenumber*), yaitu zona I (*single bond*, 2500–4000 cm⁻¹), zona II (*triple bond*, 2000–2500 cm⁻¹), zona III (*double bond*, 1500–2000 cm⁻¹), dan zona IV (*fingerprint*, <1500 cm⁻¹) seperti pada **Gambar 2.5**. Setiap zona tersebut merepresentasikan jenis ikatan dan gugus fungsi tertentu yang terdapat dalam struktur molekul suatu senyawa.



Gambar 2.5 Spektrum FTIR pada Gelombang 4000-500 (a) dan 500-4000 cm⁻¹ (b)
(Sumber: Nandiyanto *et al.*, 2023)

Tabel 2.3 *Single Bond Area* (3250-3650 cm⁻¹)

Functional group/assignment	Wavenumber (cm ⁻¹)
Hydrogen bond in H ₂ O/-IH/NH ₃ -NH ₂	3250-3650 (broad) Followed by 600-800 1000-1200

	1300-1600
Hydrogen bond in a alcohol/phenol	3550-3670 (sharp)
Unsaturated/aromatic compound Olefinic at 3010-3040	> 3000 (sharp)
Aliphatic compound Long-chain linear aliphatic at 2860-2935	< 3000 (sharp) Followed by 720-1470
Aldehyde	2700-2800
C-H bond	>3000

(Sumber: Nandiyanto *et al.*, 2023)

Tabel 2.4 Triple Bond Area (2000-2500 cm⁻¹)

Functional group/assignment	Wavenumber (cm ⁻¹)
Triple bond of C $\equiv$ C	2200 Followed by 600-800 1000-1200 1300-1600
Cyclic (C-C) Graphite	2350 (dual peaks)
Alcohol	2350 (not strong)

(Sumber: Nandiyanto *et al.*, 2023)

Tabel 2.5 Double Bond Area (2000-2500 cm⁻¹)

Functional group/assignment	Wavenumber (cm ⁻¹)
Carbonyl C=O	1650-1850
Active carbonyl (e.g. anhydrides, halide acids, or halogenated carbonyl) Ring-carbonyl carbons (e.g. lactone, or organics carbonate).	> 1775
Simple carbonyl (e.g. ketones, aldehyde, ester, carbonyl)	1700-1750
Amide/carboxylate	< 1700
Double bond carbon (C=C): olefinic compounds	1650
Unsaturated bond (e.g. double and triple bond)	1620-1670
Double bonds (C=C): aromatic compounds	1600-1650 (sharp)
Aromatic ring (C-H)	1495-1615 Followed by 670-850 (probably) 3000-3150 (C-H stretching)

(Sumber: Nandiyanto *et al.*, 2023)

Tabel 2.6 Kelompok Fungsional pada Puncak FTIR (<1500 cm⁻¹)

Functional group/assignment	Wavenumber (cm ⁻¹)
Silicate ion	900-1100
Phosphate ion	1000-1100
Sulfate ion	1080-1130/(680-610) ¹⁾
Nitrate ion	1350-1380/(840-815) ¹⁾
Carbonate ion	1410-1490/(880-860) ¹⁾
Cyanide ion, thiocyanate ion, and related ions	2000-2200

Ammonium ion	3030-3300/(1390-1430) ¹⁾
--------------	-------------------------------------

(Sumber: Nandiyanto *et al.*, 2023)

Ket: ¹⁾ Biasanya, puncak pertama intens dan lebar, sedangkan puncak kedua memiliki intensitas lemah hingga sedang dan sempit. Keduanya sering kali muncul sebagai struktur ikatan rangkap, dan dapat digunakan untuk mengkarakterisasi senyawa individual.

2.1.8.10 Particle Size Distribution (PSD)

Particle Size Distribution (PSD) adalah distribusi ukuran partikel dalam suatu material atau suspensi yang menggambarkan proporsi partikel dalam berbagai rentang ukuran. Dalam pengolahan lumpur, PSD berperan dalam perubahan sifat fisik lumpur, seperti struktur pori filter *cake*, permeabilitas, dan efisiensi *dewatering*. Kandungan partikel halus dalam lumpur memiliki pengaruh besar terhadap pembentukan pori-pori pada filter *cake*. Partikel-partikel halus cenderung mengisi ruang antar-pori dan menghasilkan struktur filter *cake* dengan jumlah mikropori yang tinggi, porositas yang rendah, serta saluran aliran air yang berliku-liku (*tortuosity*). Kondisi ini menyebabkan penurunan laju *dewatering*, peningkatan waktu filtrasi, dan kadar air akhir yang lebih tinggi pada lumpur hasil penyaringan (Zhuo *et al.*, 2022).

Guna mengukur dan menganalisis distribusi ukuran partikel secara akurat, digunakan alat *Particle Size Analyzer* (PSA) yang mampu memberikan data kuantitatif mengenai proporsi partikel dalam rentang ukuran tertentu. PSA bekerja berdasarkan prinsip interaksi partikel dengan medan eksternal, seperti hamburan cahaya (*laser diffraction*) atau perubahan impedansi listrik (*coulter principle*) sehingga memungkinkan karakterisasi PSD secara cepat dan *reproducible* (Nijhu *et al.*, 2024). *Particle Size Analyzer* (PSA) bekerja dengan membaca partikel sekunder dimana partikel tersebut berasal dari proses aglomerasi ukuran partikel yang dihasilkan oleh sampel. Proses aglomerasi merupakan kecenderungan partikel kecil yang bergabung antara satu sama lain menjadi agregat yang lebih besar dalam larutan suspensi. Proses tersebut akan berhenti saat kestabilan partikel sekunder telah dicapai. Hukum *Ostwald* menjelaskan mengenai kecenderungan pembentukan partikel kecil (primer) menjadi partikel besar (sekunder) setelah terjadi nukleasi dan pertumbuhan partikel primer (Mujiyanti *et al.*, 2019).

Parameter penting yang diperoleh dari PSA meliputi nilai D10, D50, dan D90 yang menunjukkan ukuran partikel pada persentil kumulatif 10%, 50%, dan 90%, serta indeks polidispersitas yang menggambarkan keseragaman distribusi partikel. Dalam konteks pengolahan lumpur, pemahaman PSD melalui PSA sangat penting untuk mengontrol kualitas filter *cake* dan proses *dewatering* karena distribusi ukuran partikel yang sempit dan proporsi partikel halus yang tepat dapat meningkatkan permeabilitas dan efisiensi filtrasi. Selain itu, teknik sampling dan kondisi pengukuran PSA harus diperhatikan agar hasil analisis mencerminkan karakteristik lumpur secara representatif dan akurat (Houghton *et al.*, 2024).

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini diperlukan pemahaman mendalam mengenai kajian teori dan hasil penelitian terdahulu terkait penggunaan bahan alami biji kelor (*Moringa oleifera*) dalam proses pengkondisian lumpur. Penelitian terdahulu berperan penting dalam memberikan landasan teoritis dan praktis untuk menganalisis potensi biji kelor sebagai bahan pengkondisi alami dalam meningkatkan efisiensi pengkondisian lumpur (*sludge conditioning*). Berbagai studi telah dilakukan untuk meneliti efisiensi bahan alami dalam proses *dewatering* lumpur, termasuk pengaruhnya terhadap penggunaan *Aluminium Sulfate* (Alum) dan *Poly Aluminium Chloride* (PAC) sebagai bahan pengkondisi kimia. Oleh karena itu, beberapa kajian terdahulu yang relevan terkait topik tersebut dirangkum pada **Tabel 2.7**.

Tabel 2.7 Rekap Penelitian Terdahulu

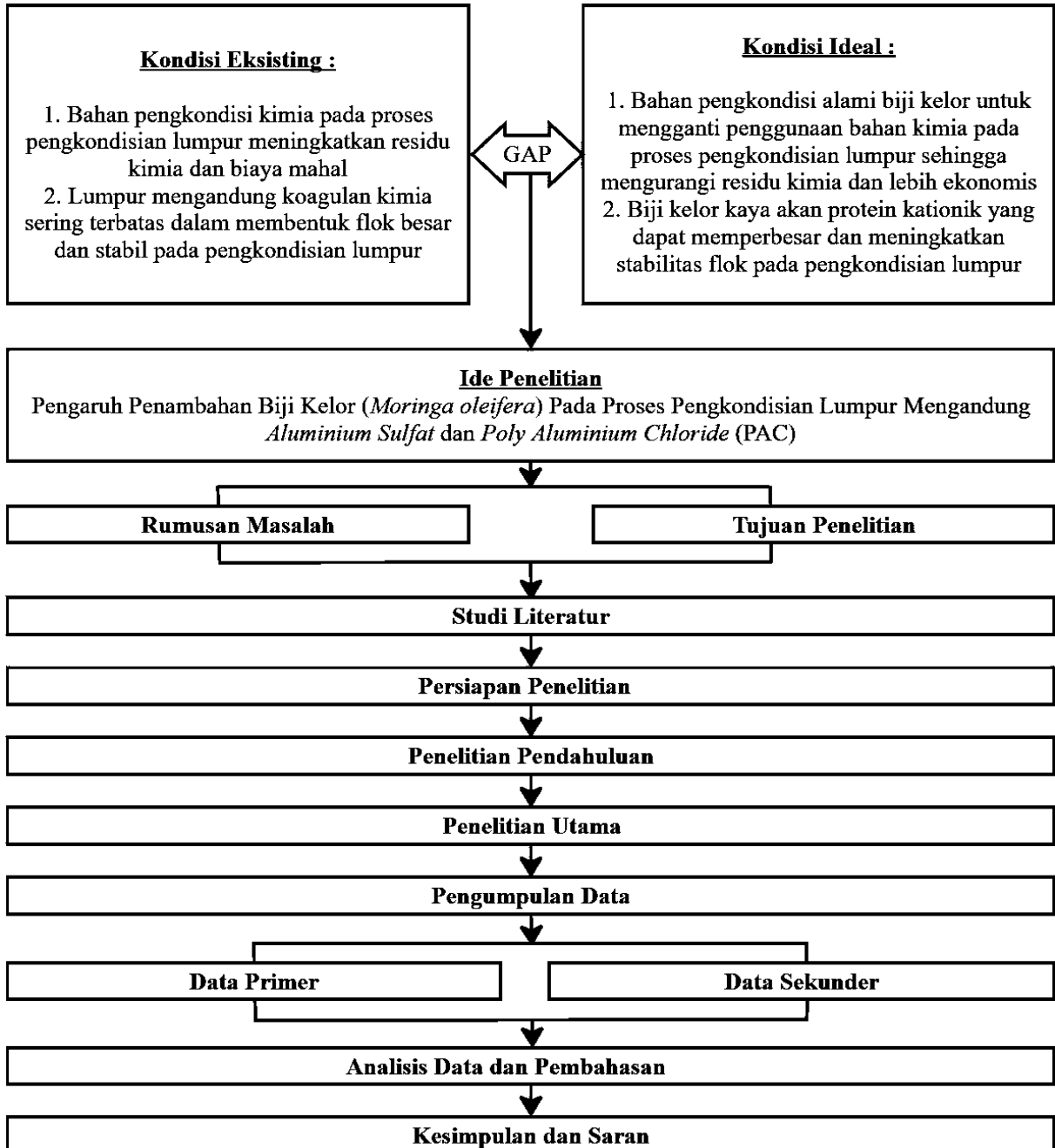
Judul	Penulis dan Tahun Terbit	Jenis lumpur	Dosis Optimal Biji Kelor	Isi Penelitian
<i>Optimization Study on Sewage Sludge Conditioning</i>	Tat <i>et al.</i> , 2015	Lumpur sintetis dari suspensi kaolin yang dicampur dengan koagulan alum	1000 – 5000 mg/L untuk semua bentuk biji kelor (bubuk, ekstrak, ekstrak NaCl).	Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki efisiensi <i>Moringa oleifera</i> dalam berbagai bentuk pada kemampuan <i>dewatering</i> lumpur setelah pengkondisian. Hasil penelitian biji kelor dalam bentuk ekstrak menunjukkan penurunan nilai <i>Capillary Suction Time</i> (CST) paling optimal, sementara penurunan nilai <i>Specific Resistance to Filtration</i> (SRF) yang efektif berbentuk bubuk biji kelor.
<i>Effective Sludge Dewatering Using Moringa oleifera Seed Extract Combined With Alumunium Sulfate</i>	Abdulazeez <i>et al.</i> , 2016	Lumpur domestik dari tangki sedimentasi di instalasi pengolahan air limbah	117,79 mg/L	Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bahan pengkondisi campuran yang terdiri dari <i>Moringa oleifera</i> dan alum dalam <i>dewatering</i> lumpur. Digunakan <i>Design of Experiment</i> (DOE) untuk mengoptimalkan rasio bahan pengkondisi campuran, dosis, pH, dan waktu pencampuran. Hasil penelitian menunjukkan kondisi proses optimum yang diperoleh adalah rasio 50:50, pH 6,5, dan waktu pencampuran 21,2 menit.
<i>Sludge Conditioning With Moringa Seed</i>	Ademiluyi, J. O., 1988	Lumpur hasil pengolahan air limbah (<i>digested domestic sludge</i>) diambil dari	2750 mg/L	Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi penerapan biji kelor sebagai bahan pengkondisian selama pengeringan lumpur. Dosis optimum biji kelor lebih baik dibandingkan dengan pengkondisi besi

Judul	Penulis dan Tahun Terbit	Jenis lumpur	Dosis Optimal Biji Kelor	Isi Penelitian
		tangki sedimentasi		klorida dalam meningkatkan kemampuan penyaringan lumpur. Konsentrasi <i>cake</i> dan filtrat meningkat seiring bertambahnya dosis benih klor selama pengeringan lumpur.
<i>Alum Sludge Dewatering Using Moringa Oleifera As A Conditioner</i>	Ghebremichael, K. A. & Hultman, B., 2004	Lumpur aktif dari tangki penampung lumpur di instalasi pengolahan air limbah	125,63 mg/L	Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan efektivitas ekstrak dari <i>Moringa oleifera</i> , tawas, dan polielektrolit sintetis untuk mengondisikan lumpur tawas dari IPAL. Perbandingan didasarkan pada uji <i>Capillary Suction Time</i> (CST), <i>Specific Resistance to Filtration</i> (SRF), uji <i>sand drainage</i> , dan kekuatan geser. Hasil penelitian menunjukkan bahwa <i>Moringa oleifera</i> dan tawas memiliki kinerja pengkondisian yang sama untuk lumpur pengolahan air limbah.
<i>Efficiency of Moringa oleifera and Polyaluminium Chloride for Sludge Thickening</i>	Ramiah, Y. & Jeetah, P., 2015	Lumpur aktif dari tangki aerasi (tanpa koagulan) di instalasi pengolahan air limbah	1750 mg/L	Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki kemungkinan penggunaan bubuk biji kelor dan ekstrak biji kelor sebagai bahan pengkondisi alami dengan tujuan menggantikan PAC dalam pengentalan lumpur aktif. Biji kelor dipilih sebagai alternatif sangat baik daripada PAC karena menghasilkan banyak biogas yang akan dihasilkan sehingga lebih ekonomis.

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Kerangka Penelitian

Metode penelitian disusun sebagai panduan sistematis yang menggambarkan tahapan pelaksanaan penelitian dari awal hingga akhir. Kerangka penelitian membantu memastikan proses penelitian berjalan secara terarah dan meminimalkan potensi kesalahan. Pada penelitian ini, kerangka penelitian dibagi menjadi dua kondisi, yaitu kondisi nyata dan kondisi ideal. Susunan kerangka penelitian yang telah dilaksanakan disajikan pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1 Kerangka Penelitian

3.2 Tahapan Pelaksanaan Penelitian

Serangkaian tahapan pelaksanaan penelitian berdasarkan **Gambar 3.1** dilakukan pada bulan Maret – Juli 2025 (5 bulan). Tahapan pelaksanaan penelitian mencakup penjelasan mengenai langkah-langkah kegiatan yang telah dilakukan serta metode yang diterapkan selama penelitian berlangsung. Penentuan tahapan ini didasarkan pada kerangka penelitian yang telah dirancang sebelumnya. Adapun tahapan-tahapan pelaksanaan penelitian sebagai berikut:

3.2.1 Kondisi Eksisting dan Kondisi Ideal

Kondisi eksisting proses pengkondisian lumpur hasil pengolahan air limbah maupun air menggunakan bahan kimia, seperti alum dan PAC diklaim efektif. Akan tetapi bahan pengkondisi tersebut memiliki kekurangan, diantaranya meningkatnya kandungan residu kimia yang berdampak ke lingkungan, biaya tinggi, dan efisiensi *dewatering* yang belum optimal. Kondisi ideal yang diharapkan adalah penggunaan biji kelor (*Moringa oleifera*) sebagai alternatif pengganti bahan pengkondisi kimia untuk meningkatkan efisiensi pengendapan, *dewatering*, dan menekan biaya operasional secara lebih ramah lingkungan.

3.2.2 Ide Penelitian

Berdasarkan analisis kondisi eksisting dan kondisi ideal, maka diperoleh *gap* yang berasal dari dua kondisi tersebut. Ide penelitian muncul dari kebutuhan untuk mengatasi kelemahan kondisi eksisting, dimana pengkondisian lumpur dengan alum dan PAC menghasilkan residu kimia yang kurang ramah lingkungan, biaya tinggi, dan efisiensi *dewatering* yang belum optimal. Oleh karena itu, diharapkan dengan penggunaan biji kelor sebagai bahan alami pada pengkondisian lumpur dapat meningkatkan efisiensi proses, mengurangi residu kimia, menekan biaya operasional, dan menciptakan pengolahan lumpur yang lebih berkelanjutan.

3.2.3 Studi Literatur

Studi literatur pada penelitian ini bertujuan untuk memperoleh teori yang relevan dengan topik penelitian sebagai dasar dalam penyusunan tugas akhir. Studi literatur dilakukan dengan mencari informasi dari beragam sumber literatur, seperti jurnal, artikel, laporan tugas akhir, tesis, buku teks, dan peraturan. Materi yang ditinjau meliputi lumpur pengolahan air, *sludge conditioning*, koagulan, parameter analisis (pH, suhu, kekeruhan, zeta potensial, TS, TSS, SRF, SEM-EDX, FTIR, dan PSD), serta informasi biji kelor.

3.2.4 Persiapan Penelitian

Pada pelaksanaan penelitian yang melibatkan pengambilan sampel, maka diperlukan penentuan lokasi terlebih dahulu, waktu pengambilan, dan jumlah sampel agar sampel lumpur yang dianalisis dapat representatif atau menggambarkan keadaan yang sebenarnya. Selanjutnya, perlu disiapkan juga alat dan bahan sehingga penelitian dapat dilaksanakan dengan lancar.

Sampel lumpur diambil pada jam operasional IPAM Legundi Gresik (Jl. Raya Legundi No. 659, Dusun Larangan, Krikilan, Kecamatan Driyorejo, Kabupaten Gresik) dan IPAM Ngagel Surabaya (Jl. Ngagel Tirta V No. 53, Ngagelrejo, Kecamatan Wonokromo, Kota Surabaya, Jawa Timur). Banyaknya jumlah pengambilan jumlah sampel dihitung berdasarkan jumlah percobaan dan pengujian masing-masing sampel lumpur. Sampel lumpur yang telah diuji diambil dari unit *outlet sedimentasi*. Adapun lokasi pengambilan sampel lumpur mengandung alum di IPAM Legundi Gresik pada unit *outlet* unit sedimentasi disajikan pada **Gambar 3.2**, sementara sampel lumpur mengandung PAC di IPAM Ngagel Surabaya *outlet* unit *clearator* disajikan pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3.2 Lokasi Pengambilan Sampel Lumpur Mengandung Alum



Gambar 3.3 Lokasi Pengambilan Sampel Lumpur Mengandung PAC

3.2.5 Persiapan Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang diperlukan pada penelitian ini dirincikan berdasarkan pengujian parameter yang telah diukur. Adapun parameter kontrol lumpur, antara lain pH dan suhu, sementara parameter uji lumpur adalah kekeruhan, *Total Solids* (TS), dan *Total Suspended Solids* (TSS), *Specific Resistance to Filtration* (SRF), komposisi unsur permukaan (SEM-EDX), gugus fungsi (FTIR), zeta potensial, dan ukuran flok (PSA).

Peralatan dan bahan sebelum menuju parameter kontrol dan uji dalam penelitian ini adalah biji kelor, blender, ayakan 70 mesh (0,212 mm), akuades, kertas saring, *vacuum filter*,

jar test apparatus, Malvern ZS XPLOERER menggunakan sel DTS1070, SEM-EDX, FTIR, dan *Particle Size Analyzer* (PSA). Biji kelor sebagai subjek utama dalam penelitian ini. Blender untuk menghaluskan biji kelor dan mencampur biji kelor dengan akuades pada pembuatan ekstrak zat aktif. Ayakan 70 mesh untuk mengayak biji kelor yang telah diblender supaya meningkatkan luas area permukaan serbuk (Abdulazeez *et al.*, 2016). Akuades untuk melarutkan serbuk yang akan digunakan dalam memperoleh zat aktif biji kelor. Kertas saring Whatman 42 diameter 125 mm sebagai media penyaring pada *vacuum filter* untuk memperoleh filtrat (ekstrak zat aktif biji kelor). *Jar test apparatus* untuk mencampurkan variasi bentuk dan dosis biji kelor terhadap lumpur. Malvern ZS XPLOERER menggunakan sel DTS1070 untuk pengujian zeta potensial serta *Particle Size Analyzer* (PSA) untuk pengujian *Particle Size Distribution* (PSD).

Metode perolehan serbuk biji kelor pada penelitian ini dimulai dengan pengeringan di oven 45°C selama 24 jam untuk mengurangi kadar air yang terkandung dalam biji kelor hingga 8%, lalu dihaluskan dengan blender dan diayak dengan ayakan 70 mesh untuk memperluas area permukaan serbuk. Biji kelor yang telah halus dikering anginkan untuk memaksimalkan pengurangan kadar air, kemudian siap digunakan sebagai bahan pengkondisi berbentuk serbuk (Munar, 2022). Sementara metode perolehan ekstrak zat aktif biji kelor dilakukan dengan melarutkan 10 gram serbuk dalam 200 mL akuades, lalu dilakukan *mixing* dengan blender rumah tangga menggunakan kecepatan maksimal selama 1 menit untuk meningkatkan gesekan dan gaya geser pelepasan protein kationik dari jaringan biji (Tat *et al.*, 2010). Kemudian dilakukan penyaringan filtrat oleh *vacuum filter* menggunakan kertas saring. Filtrat siap digunakan sebagai ekstrak zat aktif biji kelor. Faktor yang mempengaruhi perolehan ekstrak zat aktif adalah pH, ukuran serbuk, dan suhu. pH mendekati netral (6-7) karena protein aktif cenderung lebih stabil pada pH tersebut, sementara ukuran serbuk yang semakin halus (dengan ayakan 70 mesh) semakin efektif dalam mempercepat pelepasan protein. Suhu yang digunakan pada tahap ekstraksi zat aktif berada pada suhu ruang (~25°C) untuk melindungi protein dan zat aktif bekerja optimal pada suhu tersebut (Tat *et al.*, 2010).

Pengawetan biji kelor untuk penggunaan skala industri, seperti instalasi pengolahan air dilakukan dengan pemanenan biji dari polong yang sudah matang dan kering, kemudian dilanjutkan dengan pengeringan. Pengeringan dapat dilakukan dengan dijemur di tempat yang teduh dan berventilasi baik selama dua hari atau menggunakan oven pada suhu 45°C selama 24 jam hingga kadar air rendah menurun sekitar 5,8–7,5%. Setelah dikeringkan, biji kelor disimpan dalam kondisi kering dan terlindung dari kelembapan dengan suhu penyimpanan tidak melebihi 35°C untuk mencegah pertumbuhan jamur dan kerusakan akibat serangga. Dalam aplikasi industri, biji kelor dapat diolah lebih lanjut dengan cara dikupas, digiling, dan diubah menjadi serbuk yang kemudian disimpan dalam wadah tertutup rapat agar tetap awet dan siap digunakan kapan saja. Pengolahan dan penyimpanan yang tepat sangat penting untuk menjaga efektivitas protein aktif dalam biji kelor sebagai koagulan alami dalam proses penjernihan air serta memudahkan distribusi dan penggunaan dalam skala besar (Foidl *et al.*, 2001).

Salah satu metode pengeringan yang efektif dan ekonomis adalah pengeringan biji kelor menggunakan sinar matahari, terutama untuk skala industri. Berdasarkan penelitian sebelumnya, pengeringan dilakukan secara langsung di bawah sinar matahari dengan suhu sekitar 30°C selama 20 (dua puluh) jam. Proses ini mampu menurunkan kadar air dari sekitar 75,68% menjadi 7,46% yang menunjukkan penurunan kadar air signifikan dan hampir setara dengan pengeringan menggunakan oven pada suhu 40°C selama 16 jam yang menghasilkan kadar air sekitar 8,20%. Meskipun pengeringan dengan sinar matahari memerlukan waktu lebih lama, metode ini lebih hemat energi dan tetap efektif dalam menjaga kualitas bahan kering. Pengeringan dilakukan dengan menempatkan biji kelor dalam satu lapisan pada nampan terbuka di udara terbuka disertai penutup kain/kasa untuk menghindari sinar matahari langsung.

Oleh karena itu, metode ini sangat sesuai untuk skala industri yang mengutamakan efisiensi energi dan biaya (Paramita *et al.*, 2021).

Selanjutnya, alat dan bahan untuk menunjang penelitian ini berdasarkan parameter dirincikan pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1 Daftar Alat dan Bahan Menurut Parameter

Parameter	Alat & <i>Glassware</i>	Bahan
pH	pH meter Pipet ukur <i>Bulb propipet</i>	Akuades Larutan buffer 4.01;6.86;9.18 Sampel lumpur
Suhu	Termometer laboratorium	Akuades Sampel lumpur
Kekeruhan	Turbidimeter Gelas beaker	Sampel lumpur
Zeta Potensial	<i>Zeta Sizer</i>	Akuades Sampel lumpur
<i>Particle Size Distribution</i>	<i>Particle Size Analyzer (PSA)</i>	Akuades Sampel lumpur
TS	<i>Furnace</i> Oven Desikator Neraca analitik Cawan porselen Pinset Nampan	Kertas saring Sampel lumpur
TSS	<i>Furnace</i> Oven Desikator Neraca analitik Cawan porselen <i>Vacuum filter</i> Pinset	Akuades Kertas saring Sampel lumpur
SRF	<i>Vacuum filter</i> Timbangan	Akuades Kertas saring Sampel lumpur
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>	Sampel Lumpur
FTIR	<i>FTIR Spectrophotometer</i>	Sampel Lumpur

3.2.6 Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan ini bertujuan untuk membantu memperdalam informasi yang diperlukan untuk pengerjaan penelitian utama. Bentuk penelitian pendahuluan berupa pengujian kondisi lumpur yang tidak diberi perlakuan biji kelor dan dengan perlakuan penambahan dosis biji kelor. Penelitian ini dilakukan menggunakan 2 (dua) variabel bebas, yaitu jenis lumpur dan bentuk biji kelor. Variabel terikat pada penelitian ini, meliputi uji kekeruhan supernatan setelah pemisahan lumpur, *Total Solid (TS)*, *Total Suspended Solids (TSS)*, dan *Specific Resistance to Filtration (SRF)* lumpur, komposisi unsur permukaan (SEM-EDX), gugus fungsi (FTIR), nilai zeta potensial lumpur, dan ukuran flok (PSA). Sementara variabel kontrol yang digunakan adalah pH dan suhu sampel, lama pengadukan, waktu pengendapan, dan volume sampel selama pengujian.

Sebanyak 8 set sampel uji, meliputi 1 sampel tanpa biji kelor dan 7 sampel dengan dosis biji kelor dilakukan perlakuan *jar test*. Sampel tanpa biji kelor digunakan sebagai dasar referensi untuk membandingkan hasil sampel dengan penambahan biji kelor sehingga efek dari biji kelor dapat dianalisis secara kuantitatif. Uji kondisi lumpur dilakukan dengan menganalisis pH, suhu, kekeruhan, *Total Solid* (TS), *Total Suspended Solids* (TSS), dan *Specific Resistance to Filtration* (SRF), komposisi unsur permukaan, gugus fungsi, zeta potensial, dan ukuran flok lumpur. Pengujian kondisi lumpur dilakukan pada rentang maksimal 2 jam setelah pengambilan sampel pada masing-masing IPAM yang bertujuan menghindari penuaan lumpur akibat penyimpanan sampel terlalu lama (Hosnani, 2010 dalam Rahardja, 2013). Sampel lumpur sebanyak 1 liter diaduk secara manual menggunakan pengaduk selama 1 menit supaya terhomogenisasi, kemudian lumpur dilakukan pengujian (Rahardja, 2013).

Penentuan dosis penambahan biji kelor berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Tat *et al.*, (2010) bahwa dosis optimal untuk semua bentuk biji kelor (bubuk, ekstrak air distilasi, dan ekstrak NaCl) terhadap pengkondisian lumpur limbah domestik berada pada rentang 1000-5000 mg/L. Pada penelitian ini, dilakukan pengkondisian terhadap lumpur hasil pengolahan IPAM dimana dosis dapat lebih kecil ataupun lebih besar dari acuan penelitian terdahulu. Oleh karena itu, dosis penambahan biji kelor dilakukan untuk mengkaji pengaruh penambahan biji kelor dalam bentuk serbuk kering maupun ekstrak dengan variasi dosis yang dirincikan pada **Tabel 3.2**.

Tabel 3.2 Percobaan Dosis pada Penelitian Pendahuluan

Jenis Lumpur	Variasi Bentuk Kelor	Dosis Kelor (mg/L)	Nama Sampel
Lumpur Alum	Serbuk (A)	100	A1 (a)
		250	A2 (a)
		500	A3 (a)
		750	A4 (a)
		1000	A5 (a)
		2500	A6 (a)
		5000	A7 (a)
	Ekstrak (B)	100	B1 (a)
		250	B2 (a)
		500	B3 (a)
		750	B4 (a)
		1000	B5 (a)
		2500	B6 (a)
		5000	B7 (a)
Lumpur PAC	Serbuk (A)	100	A1 (p)
		250	A2 (p)
		500	A3 (p)
		750	A4 (p)
		1000	A5 (p)
		2500	A6 (p)
		5000	A7 (p)
	Ekstrak (B)	100	B1 (p)
		250	B2 (p)
		500	B3 (p)
		750	B4 (p)
		1000	B5 (p)

Jenis Lumpur	Variasi Bentuk Kelor	Dosis Kelor (mg/L)	Nama Sampel
		2500	B6 (p)
		5000	B7 (p)

Pada penelitian ini, kecepatan pengadukan sebesar 180 rpm dipilih untuk tahap penghomogenan biji kelor (*Moringa oleifera*) dalam proses pengkondisian lumpur karena efektif dalam mendispersikan koagulan alami secara merata ke seluruh volume sampel tanpa merusak struktur flok yang terbentuk di tahap selanjutnya. Kecepatan ini termasuk dalam rentang 100–300 rpm yang bertujuan untuk mencampurkan koagulan secara merata dan mempercepat kontak antara partikel tersuspensi dengan bahan aktif dari biji kelor. Kecepatan pengadukan dilakukan selama 30 menit dimana tergolong ringan-sedang yang diharapkan untuk memberi waktu interaksi bahan aktif biji kelor tanpa merusak flok serta meningkatkan efisiensi proses pengkondisian sebelum pengujian SRF.

Meskipun sebagian besar studi sebelumnya, seperti oleh Ndabigengesere *et al.*, (1995), menggunakan kecepatan sekitar 100–150 rpm, dalam praktik laboratorium, penggunaan 180 rpm masih berada dalam batas aman untuk homogenisasi dan telah digunakan dalam beberapa studi aplikasi *jar test* dengan hasil yang baik, seperti yang dilaporkan oleh Ghebremichael *et al.*, (2005). Oleh karena itu, pemilihan 180 rpm dinilai relevan dan sejalan dengan prinsip koagulasi cepat menggunakan koagulan alami berbasis protein tanaman seperti biji kelor.

Pengadukan *jar test* dilakukan menggunakan diameter *impeller* sebesar 0,06 m, volume sampel 500 mL, dan waktu selama 30 menit sehingga diperoleh nilai G sebesar 15 s^{-1} yang menghasilkan GTd sebesar 27.000. Nilai G yang dihasilkan lebih kecil dari 48.000–210.000 yang termasuk jenis pengadukan lambat kisaran $20\text{--}200 \text{ s}^{-1}$, namun total energi campuran tetap memadai untuk pembentukan flok.

3.2.7 Penelitian Utama

Penelitian utama dilakukan dengan memilih tiga dosis dari penelitian pendahuluan berdasarkan nilai SRF terendah (**Tabel 3.3**). Hal tersebut dikarenakan semakin rendah nilai SRF menunjukkan bahwa air semakin mudah terlepas dari lumpur sehingga dapat meningkatkan efisiensi *dewatering*. Ketiga dosis kemudian diuji nilai zeta potensial untuk menjelaskan mekanisme pengikatan antara protein kationik biji kelor dan partikel lumpur sehingga dapat diketahui dosis optimal. Strategi pemilihan ini dilakukan untuk mengoptimalkan sumber daya analisis, sekaligus tetap memperoleh data yang representatif dan berkualitas. Dengan memfokuskan analisis lanjutan pada dosis terbaik berdasarkan performa SRF, hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih dalam mengenai mekanisme interaksi antara bahan alami (biji kelor) dan lumpur, baik dari segi fisik maupun kimia.

Uji SEM-EDX juga diperlukan untuk mengamati perubahan morfologi atau struktur fisik lumpur yang terbentuk akibat pengaruh dosis biji kelor sehingga dapat memberikan informasi perubahan struktur dan komposisi lumpur setelah penambahan biji kelor (tujuan 2). Sementara, uji FTIR untuk mengidentifikasi gugus fungsi aktif dalam biji kelor yang kemungkinan berperan dalam proses pengkondisian sehingga dapat memberikan informasi mekanisme bagaimana biji kelor memengaruhi proses pengkondisian lumpur (tujuan 2). Uji SEM-EDX dan FTIR dilakukan pada biji kelor (ekstrak), sampel lumpur 0 mg/L kelor, dan sampel lumpur (ekstrak) pada dosis tertentu.

Dilanjutkan pengujian ukuran flok atau *Particle Size Distribution* (PSD) pada dosis terpilih setiap jenis lumpur dan bentuk biji kelor untuk mengetahui distribusi partikel pada lumpur yang telah dikondisikan dengan biji kelor sehingga dapat mendukung tujuan 3. Dengan

demikian, uji PSA berperan sebagai penguat analisis akhir untuk memahami bahwa dosis optimum biji kelor tidak hanya menghasilkan efisiensi *dewatering* yang tinggi, tetapi juga membentuk flok dengan ukuran yang lebih besar dan terdistribusi merata. Pemilihan dosis terlebih dahulu memastikan bahwa data yang diperoleh dari PSA benar-benar merepresentasikan sampel terbaik sehingga hasilnya bersifat representatif.

Tabel 3.3 Variasi Penelitian

Jenis Lumpur	Variasi Bentuk Kelor	Dosis Biji Kelor Terpilih (mg/L)			
		0 mg/L	Dosis Terendah SRF		
Lumpur Alum	Serbuk (A)	A0 (a)	Ax (a)	Ay (a)	Az (a)
	Ekstrak (B)	B0 (a)	Bx (a)	By (a)	Bz (a)
Lumpur PAC	Serbuk (A)	A0 (p)	Ax (p)	Ay (p)	Az (p)
	Ekstrak (B)	B0 (p)	Bx (p)	By (p)	Bz (p)

Parameter pada penelitian ini dianalisis dengan metode yang disesuaikan dengan Standar Nasional Indonesia maupun standar lainnya yang sesuai dengan ketentuan berlaku. Setiap parameter menggunakan metode untuk memperoleh nilai yang dijabarkan pada **Tabel 3.4**.

Tabel 3.4 Metode Analisis Parameter Penelitian

No	Parameter	Jenis Analisis	Metode	Sumber
1	Parameter Kontrol	pH	Potensiometri	SNI/APHA
2		Suhu	Termometri	
3	Parameter Uji	Kekeruhan	Turbidimetri	
4		<i>Total Solids</i> (TS)	Gravimetri	
5		<i>Total Suspended Solids</i> (TSS)	Gravimetri	
6		<i>Spesific Resistance to Filtration</i> (SRF)	Volumetrik	
7		SEM-EDX	<i>Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i>	
8		FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>	
9		Zeta potensial	Elektroforesis	
10		<i>Particle Size Distribution</i> (PSD)	Laser Diffraction	

3.2.8 Pengumpulan Data Primer

Data primer adalah data yang diperoleh melalui pengambilan sampel dan pengujian lumpur melalui uji laboratorium. Data primer yang diperlukan dalam tugas akhir, meliputi hasil uji pH, suhu, kekeruhan, TS, TSS, SEM, FTIR, zeta potensial, serta PSD. Selain itu, juga diperlukan informasi mengenai waktu pengurasan lumpur pada lokasi sampling setiap IPAM kepada petugas lapangan karena dapat mempengaruhi kadar air pengujian.

3.2.9 Pengumpulan Data Sekunder

Data sekunder adalah data yang didapatkan melalui studi literatur berbentuk tinjauan pustaka yang sudah ada tanpa melakukan penelitian langsung di lapangan. Data sekunder yang dibutuhkan untuk menunjang tugas akhir adalah informasi biji kelor sebagai bahan alami di berbagai aplikasi dalam pengkondisian lumpur, efisiensi alum dan PAC dalam pengkondisian lumpur sebagai pembanding ketika terjadi penambahan kelor, hubungan parameter SRF dan efisiensi *dewatering* dari penelitian sebelumnya, serta data empiris pengaruh koagulan terhadap karakteristik lumpur.

3.2.10 Analisis Data dan Pembahasan

Analisis data dilakukan berdasarkan hasil uji sampel setiap parameter pada variasi bentuk dan dosis biji kelor. Analisis data dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan biji kelor dan dosis optimal biji kelor pada proses pengkondisian lumpur mengandung alum dan PAC. Perlakuan tanpa biji kelor dan perlakuan dengan biji kelor menjadi kontrol penelitian ini untuk mengetahui adanya pengaruh penambahan biji kelor pada aspek kecepatan pemisahan air dengan padatan dalam lumpur dan persen penurunan kadar air. Pengolahan data dilakukan menggunakan *software microsoft excel* untuk menyajikan hasil analisis dalam bentuk tabel dan grafik hubungan pada laporan penelitian, seperti grafik yang menunjukkan volume terhadap waktu untuk mencari nilai dV/dt terkecil serta grafik nilai SRF terhadap dosis biji kelor dibantu dengan analisis lanjutan berupa SEM, FTIR, dan PSD untuk mendapatkan dosis optimal.

Nilai SRF untuk setiap lumpur yang dikondisikan ditentukan dengan memplot waktu filtrasi yang telah berlalu per volume filtrat (t/V) dengan volume filtrat yang dikoreksi pada tekanan vakum yang ditentukan (Persamaan 3.1). Kemiringan garis adalah konstanta b yang digunakan untuk menghitung nilai *Specific Resistance to Filtration* (Ozacar & Sengil, 2000).

$$r = \frac{2PA^2b}{\mu W} \dots \dots \dots (3.1)$$

Dengan :

- b = Kemiringan t/V (s/m^6)
- P = Tekanan filtrasi (N/m^2)
- μ = Viskositas ($N \cdot s/m^2$)
- W = Densitas padatan kering (kg/m^3)
- r = *Specific resistance to filtration* (m/kg)
- A = Luas area kertas saring (m^2)

Kertas saring yang digunakan uji SRF adalah Whatman No. 42 dengan ukuran pori 2.5 μm untuk memisahkan air dari lumpur selama pengujian SRF. Ukuran pori tersebut dirancang untuk memberikan filtrasi yang efisien dan dapat menangani volume lumpur yang diuji. Tekanan yang digunakan dalam pengujian SRF pada alat *vacuum pump* adalah 49-51 kPa. Penetapan rentang tekanan uji tersebut didasarkan pada standar umum yang digunakan dalam pengujian SRF yang bertujuan mensimulasikan kondisi operasional yang realistis dalam proses *dewatering* lumpur. Penggunaan tekanan yang seragam juga memfasilitasi perbandingan hasil antara berbagai studi dan aplikasi praktis. Dengan demikian, diharapkan dapat memastikan hasil yang akurat dan dapat diandalkan. Tekanan 49 kPa banyak digunakan dalam penelitian lain yang mempelajari filtrasi lumpur, seperti yang dilakukan oleh Ghebremichael & Hultman, (2004). Sementara, tekanan 51 kPa memberikan keseimbangan antara gaya vakum yang cukup untuk mendorong filtrasi lumpur secara efektif tanpa mengganggu karakteristik lumpur yang diuji (Metcalf & Eddy, 2014). Rentang tekanan tersebut memiliki perbedaan 2 kPa atau sangat kecil sehingga tidak berdampak signifikan pada hasil filtrasi. Pemilihan rentang tersebut juga

disebabkan karena kondisi alat *vacuum pump* yang dimiliki sering mengalami fluktuasi tekanan kecil secara alami ketika digunakan.

Nilai SRF tiga terendah dari masing-masing variasi dianalisis zeta potensial. Di sisi lain, dilakukan analisis SEM-EDX dan FTIR pada sampel biji kelor (ekstrak), sampel lumpur 0 mg/L biji kelor, dan sampel lumpur (dengan biji kelor) pada dosis tertentu. Analisis SEM-EDX dan FTIR berperan untuk memperoleh informasi lebih mendalam mengenai karakteristik lumpur antara sampel lumpur tanpa dan dengan proses pengkondisian. Dari hasil analisis zeta potensial dan beberapa parameter lainnya akan didapatkan dosis optimal biji kelor. Dosis optimal selanjutnya dilakukan pengujian *Particle Size Distribution* (PSD) untuk mengetahui distribusi partikel pada lumpur setelah pengkondisian sebagai penguat analisis akhir.

3.2.11 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil analisis dan pembahasan yang dibandingkan dengan tinjauan pustaka. Kesimpulan harus mampu menjawab tujuan penelitian dan menjadi solusi untuk mengatasi permasalahan terkait penggunaan bahan pengkondisi kimia berupa alum dan PAC pada proses pengkondisian lumpur, mencakup pengaruh penambahan biji kelor sebagai bahan pengkondisi alami, dan dosis optimal biji kelor untuk meningkatkan efisiensi *dewatering* lumpur dalam proses pengkondisian.

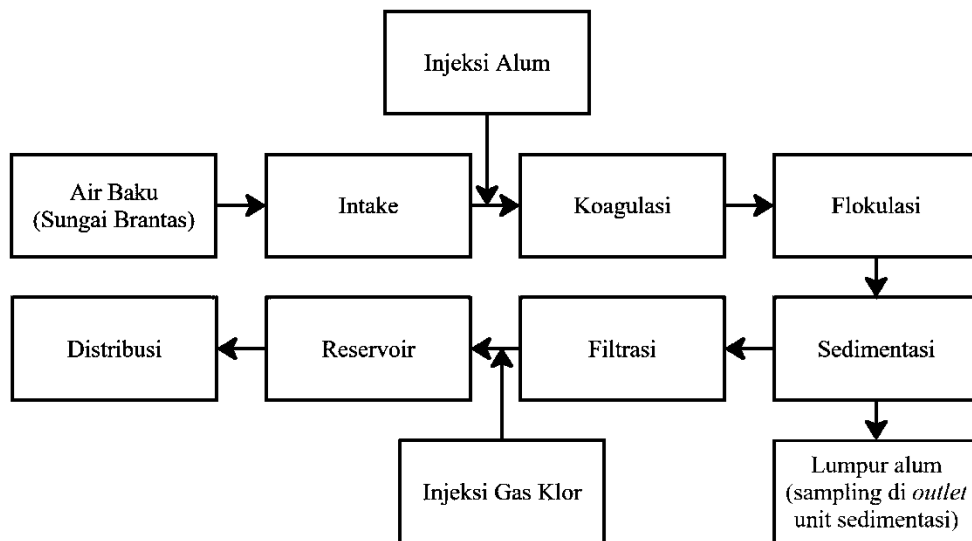
BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Awal Lumpur

4.1.1 Sumber Lumpur Alum

Lumpur alum yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) Legundi Gresik milik Perumda Giri Tirta Kabupaten Gresik. Proses pengolahan dimulai dari pengambilan air baku dari Sungai Brantas, yang kemudian masuk ke dalam unit *intake* untuk disalurkan ke tahap selanjutnya yang disajikan pada **Gambar 4.1**. Lumpur alum yang digunakan bersumber dari outlet unit sedimentasi.



Gambar 4.1 Proses Pengolahan Air Minum IPAM Legundi Gresik (Lumpur Mengandung Alum)

4.1.1.1 Timbulan Lumpur

Lumpur yang dihasilkan oleh IPAM dipengaruhi oleh kualitas air baku dan banyak koagulan yang digunakan. Volume lumpur mengandung alum dihasilkan dari unit sedimentasi IPAM Legundi Gresik. Pada bagian dasar bak sedimentasi terdapat ruang lumpur (*hopper*) yang berfungsi untuk menampung lumpur hasil endapan. Pada ruang lumpur ini dilengkapi dengan pipa drainase (penguras) yang berfungsi untuk mencegah penumpukan lumpur secara berlebihan serta menghindari terjadinya pengadukan kembali partikel yang telah mengendap. Pembuangan lumpur melalui pipa *sludge drain* dilakukan setiap 8 jam sekali secara manual dengan *valve*. Debit lumpur yang dibuang dan kuantitas lumpur IPAM Legundi Gresik tidak tersedia dari pihak instalasi pengolahan karena tidak dilakukan pengukuran volume timbulan lumpur secara berkala sehingga data historis atau operasional yang dibutuhkan untuk estimasi tidak dapat diakses.

4.1.1.2 Jenis Koagulan

Koagulan merupakan bahan kimia yang berperan menggumpalkan partikel tersuspensi dalam air supaya dapat dipisahkan pada proses pengolahan air. Pada Instalasi Air Minum (IPAM), koagulan digunakan dalam unit koagulasi-flokulasi untuk membantu proses

pembentukan flok yang kemudian dapat diendapkan dalam proses sedimentasi. Jenis koagulan Alumunium Sulfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) atau yang dikenal sebagai tawas/alum digunakan oleh Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) Legundi Gresik. Tawas cair diinjeksikan ke dalam air baku pada proses pengolahan air menggunakan pompa. Pada penelitian ini, lumpur yang dianalisis berasal dari proses pengolahan air yang menggunakan alum sebagai koagulan utama. Lumpur hasil pengolahan IPAM Legundi Gresik tersebut telah dilakukan perlakuan dengan menambahkan biji kelor untuk melihat pengaruh pada proses pengkondisian lumpur.

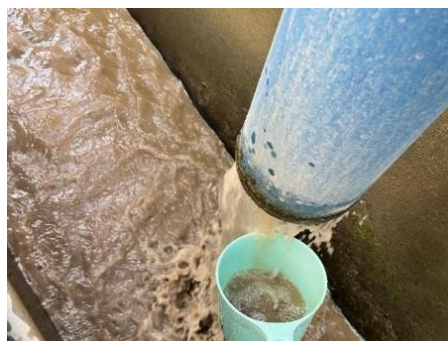


Gambar 4.2 Injeksi Tawas Cair IPAM Legundi Gresik
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

4.1.1.3 Karakteristik Lumpur Alum

a. Warna

Lumpur yang dihasilkan dari proses pengolahan air di Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) Legundi Gresik dengan menggunakan koagulan alum ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) memiliki warna dominan cokelat muda (lumpur segar) hingga keabu-abuan (lumpur tua). Warna ini berasal dari partikel tersuspensi yang terkoagulasi dan senyawa aluminium hidroksida yang terbentuk selama proses koagulasi-flokulasi (Huang & Shiu, 1996).



Gambar 4.3 Lumpur Segar IPAM Legundi Gresik
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

b. Bau

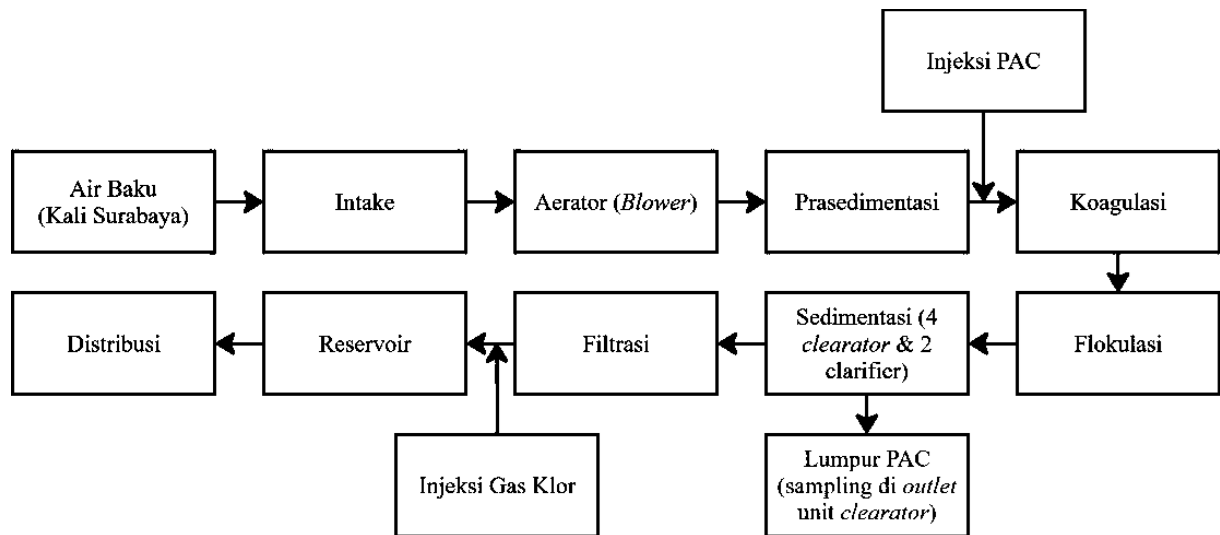
Lumpur alum umumnya tidak memiliki bau menyengat seperti lumpur hasil pengolahan air IPAM Legundi Gresik. Namun, dalam kondisi penyimpanan anaerob (misalnya dalam tangki penampungan lumpur tanpa aerasi), bau anyir atau asam ringan dapat muncul akibat pembusukan senyawa organik (Metcalf & Eddy, 2014).

c. Tekstur

Berdasarkan **Gambar 4.3**, flok yang terbentuk dari penggunaan alum memiliki ukuran lebih kecil dibandingkan penggunaan PAC. Kecepatan pengendapan dari penggunaan alum juga lebih rendah daripada penggunaan PAC (Widiawati *et al.*, 2024).

4.1.2 Sumber Lumpur PAC

Lumpur PAC yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) Ngagel 1 Surabaya, yang dikelola oleh PDAM Surya Sembada. Proses pengolahan diawali dengan pengambilan air (*intake*) dari sungai yang kemudian dialirkan ke dalam sistem pengolahan air seperti yang disajikan pada **Gambar 4.4**. Sampel lumpur mengandung PAC diambil dari unit *clearator* IPAM Ngagel 1 Surabaya.



Gambar 4.4 Proses Pengolahan Air Minum IPAM Ngagel 1 Surabaya (Lumpur Mengandung PAC)

4.1.2.1 Timbulan Lumpur

Volume lumpur hasil WTP dipengaruhi oleh kualitas air baku dan banyak koagulan yang digunakan. Volume lumpur dihasilkan dari unit *clearator* IPAM Ngagel 1 Surabaya. Pipa *sludge drain* digunakan untuk membuang lumpur yang dihasilkan oleh unit ini melalui sistem pembuangan otomatis. Pembuangan lumpur melalui *pipa sludge drain* dibantu oleh udara pada alat pembuka *valve* yang disebut solenoid. Durasi pembuangan lumpur di setiap titik disesuaikan dengan kondisinya. Pada umumnya, pembuangan lumpur memerlukan waktu 30 detik sekali saat musim hujan, sedangkan pada musim kemarau hanya membutuhkan waktu 10 detik sekali. Pada penelitian ini pembuangan dilakukan pada musim kemarau. Dalam memperoleh perkiraan rata-rata lumpur yang dibuang di IPAM Ngagel 1 Surabaya, dibutuhkan

data selama 3 bulan. Debit lumpur yang dibuang rata-rata adalah 14.872 m³/hari. Data kuantitas lumpur IPAM Ngagel I Surabaya dapat dilihat pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4.1 Rata-rata Volume Lumpur yang Dibuang Setiap Bulan (Januari-April 2025)

Bulan	Penggunaan koagulan(kg)	Rata-rata (m ³ /hari)	
		Debit Air Baku	Pembuangan Lumpur
Januari 2025	14.428	161319,68	14665
Februari 2025	12.033	163636,03	14876
Maret 2025	9.067	165528,21	15048
April 2025	6.747	163883,03	14898

(Sumber: PDAM Surya Sembada Ngagel 1 Surabaya)

4.1.2.2 Jenis Koagulan

Pada Instalasi Air Minum (IPAM), koagulan digunakan dalam unit koagulasi-flokulasi untuk membantu proses pembentukan flok yang kemudian dapat diendapkan dalam proses sedimentasi. Koagulan adalah bahan kimia yang berfungsi menggumpalkan partikel tersuspensi dalam air supaya dapat dipisahkan pada proses pengolahan air. Jenis koagulan *Poly Aluminium Chloride* (PAC) digunakan oleh Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) Ngagel 1 Surabaya. PAC cair diinjeksikan ke dalam air baku pada proses pengolahan air menggunakan pompa melalui pipa menuju unit *clearator*. Pada penelitian ini, lumpur yang dianalisis berasal dari proses pengolahan air yang menggunakan PAC sebagai koagulan utama. Lumpur hasil pengolahan IPAM Ngagel 1 Surabaya tersebut telah dilakukan perlakuan dengan menambahkan biji kelor untuk melihat pengaruh pada proses pengkondisian lumpur.

4.1.2.3 Karakteristik Lumpur PAC

a. Warna

Lumpur dari proses koagulasi menggunakan *Poly Aluminium Chloride* (PAC) cenderung memiliki warna lebih gelap, yakni cokelat tua (lumpur segar) atau abu-abu pekat (lumpur tua). Hal tersebut disebabkan oleh perbedaan struktur kimia PAC yang menghasilkan flok dengan kandungan logam terpolimerisasi yang lebih tinggi, serta interaksi dengan bahan organik yang lebih kompleks (Moussas & Zouboulis, 2009; Pernitsky & Edzwald, 2006).



Gambar 4.5 Lumpur Segar IPAM Ngagel 1 Surabaya
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

b. Bau

Lumpur PAC yang dihasilkan dari unit clearator IPAM Ngagel 1 Surabaya hampir tidak memiliki bau karena PAC menghasilkan flok yang lebih bersih dari sisa bahan organik terlarut.

c. Tekstur

Berdasarkan **Gambar 4.5**, flok yang terbentuk dari penggunaan PAC memiliki ukuran lebih besar dibandingkan penggunaan alum. Kecepatan pengendapan dari penggunaan PAC juga lebih tinggi daripada penggunaan alum (Widiawati *et al.*, 2024).

Secara umum, perbedaan antara lumpur mengandung aluminium sulfat dan *Poly Aluminium Chloride* (PAC) adalah sebagai berikut.

Tabel 4.2 Perbedaan Lumpur mengandung Alum dan PAC

Aspek	Lumpur mengandung Alum	Lumpur mengandung PAC
Koagulan asal	Aluminium Sulfat (garam aluminium anorganik sederhana)	<i>Poly Aluminium Chloride</i> (PAC)
Warna	Cokelat muda (lumpur segar) hingga keabu-abuan (lumpur tua)	Cokelat tua (lumpur segar) atau abu-abu pekat (lumpur tua)
Bau	Tidak berbau (lumpur segar)	Tidak berbau (lumpur segar)
Bentuk flok	Halus, ringan, dan kurang padat	Besar, padat dan kompak
Kecepatan pengendapan	Lebih rendah	Lebih tinggi

(Sumber: Survei Lapangan)

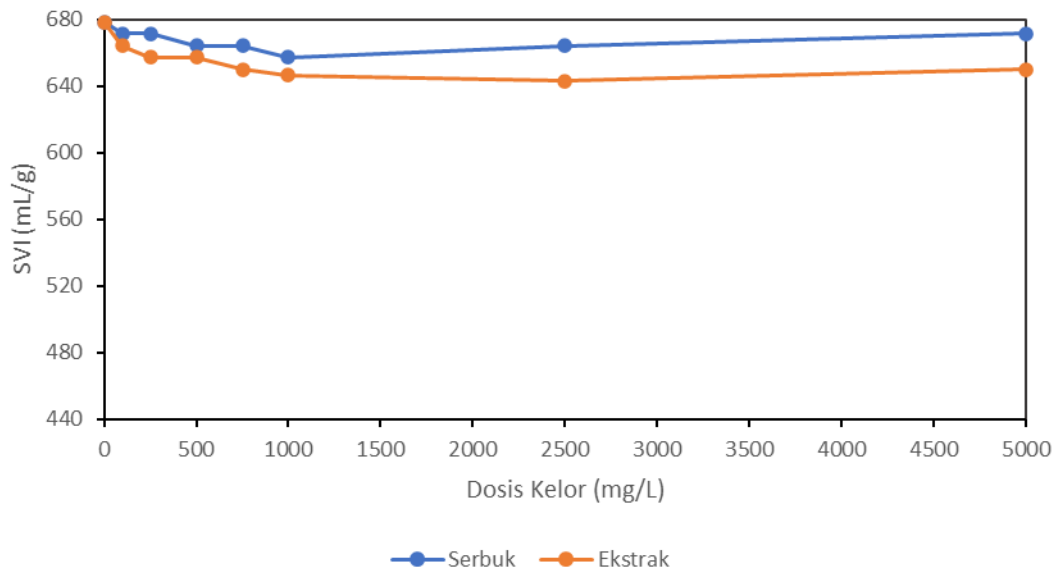
4.2 Hasil dan Pembahasan Penambahan Biji Kelor pada Lumpur

4.2.1 *Sludge Volume Index* (SVI)

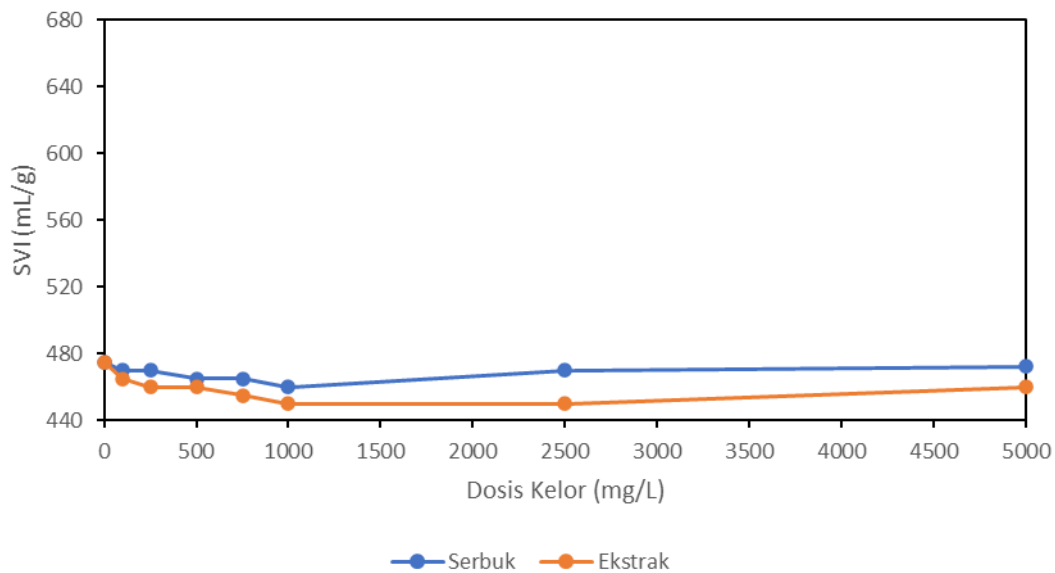
Lumpur yang telah homogen didiamkan selama 30 menit supaya mengendap sehingga endapan dapat dianalisis SVI. Hasil perhitungan SVI untuk seluruh sampel disajikan pada **Gambar 4.6** hingga **Gambar 4.7**.

Nilai SVI pada sampel lumpur alum maupun PAC yang ditambahkan biji kelor cenderung menurun seperti yang terlihat pada **Gambar 4.6** dan **Gambar 4.7**. Semakin menurun nilai SVI, menunjukkan bahwa semakin cepat lumpur mengendap (Said & Utomo, 2007). Hal tersebut disebabkan karena semakin tinggi dosis biji kelor (dalam rentang optimal), maka flok yang terbentuk juga semakin besar dan kompak sehingga nilai SVI menurun. Nilai SVI awal sampel lumpur mengandung alum tanpa penambahan biji kelor berada pada nilai tertinggi, yaitu 678,57 mL/g. Penambahan biji kelor baik dalam bentuk serbuk maupun ekstrak menyebabkan penurunan nilai SVI secara signifikan. Penurunan paling rendah terjadi pada dosis 1000 mg/L untuk bentuk serbuk (657,14 mg/L) dan 2500 mg/L untuk bentuk ekstrak (642,86 mg/L). Namun, setelah melewati dosis optimum, nilai SVI cenderung meningkat kembali. Hal tersebut menunjukkan dosis yang terlalu tinggi dapat menyebabkan nilai SVI naik kembali karena flok menjadi terlalu ringan akibat kelebihan bahan organik (Feria *et al.*, 2017). Nilai SVI awal sampel lumpur mengandung PAC tanpa penambahan biji kelor berada pada 475,00 mg/L. Setelah ditambahkan biji kelor, nilai SVI menurun menjadi 460,00 mg/L pada dosis 1000 mg/L serbuk dan mencapai nilai terendah yaitu 450,00 mg/L pada dosis 1000-2500 mg/L ekstrak

kelor. Seperti halnya pada lumpur alum, kenaikan dosis biji kelor yang berlebihan mengakibatkan sedikit peningkatan kembali pada nilai SVI.



Gambar 4.6 Hasil Uji SVI pada Lumpur Alum



Gambar 4.7 Hasil Uji SVI pada Lumpur PAC

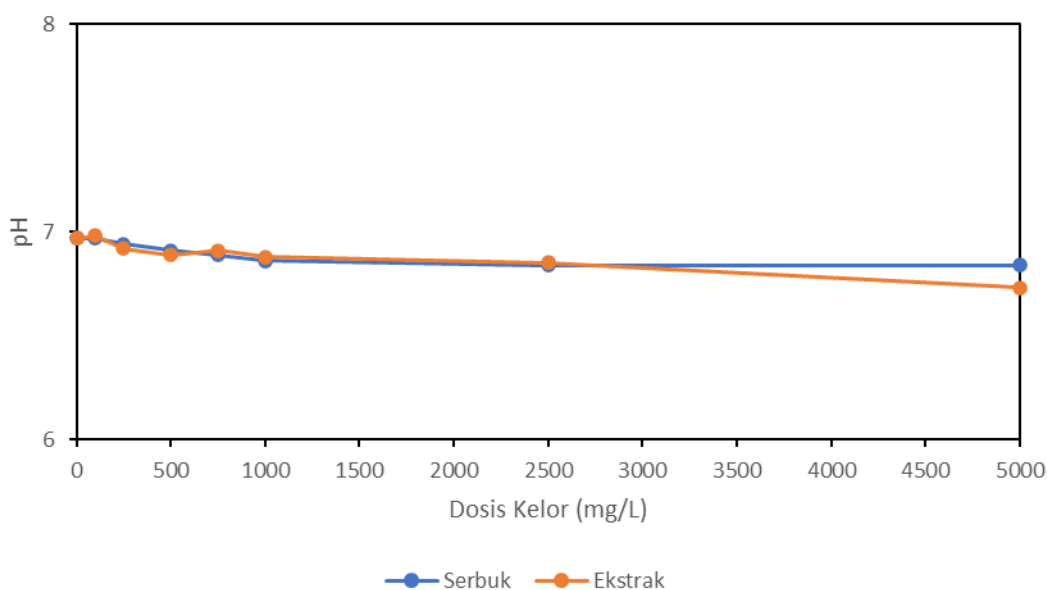
Dalam hal ini, dosis yang tinggi berada pada dosis biji kelor 2500 mg/L dan 5000 mg/L, baik berbentuk serbuk maupun ekstrak pada kedua jenis lumpur. Dengan demikian, penurunan SVI yang terjadi pada dosis biji kelor 100 mg/L, 250 mg/L, 500 mg/L, 750 mg/L, dan 1000 mg/L menunjukkan bahwa pengkondisian dengan biji kelor dapat meningkatkan kualitas sedimentasi.

4.2.2 pH dan Suhu

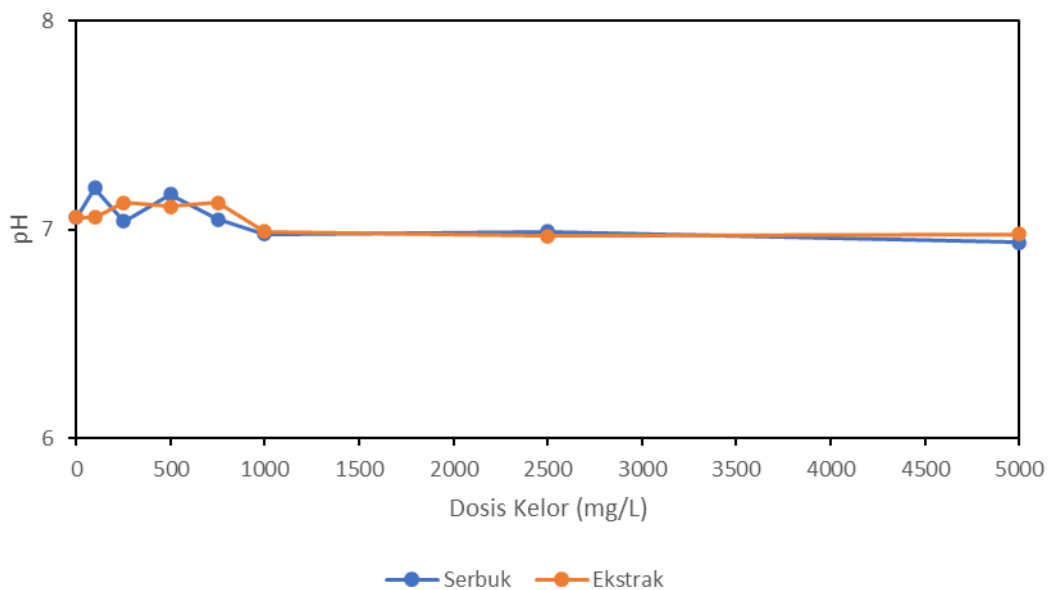
Pengukuran pH dan suhu dilakukan untuk mengetahui kondisi dasar lumpur sebelum dan setelah penambahan biji kelor serta memastikan bahwa proses pengkondisian berlangsung dalam rentang yang sesuai. Dalam penelitian ini, pH lumpur mengandung alum tanpa penambahan biji kelor berkisar antara 6,96 hingga 6,97, sementara pH lumpur mengandung PAC tanpa penambahan biji kelor berkisar antara 7,05 hingga 7,06. Setelah dilakukan penambahan biji kelor, diperoleh hasil pH pada **Gambar 4.8** dan **Gambar 4.9** serta hasil suhu yang disajikan pada **Gambar 4.10** dan **Gambar 4.11**.

Hasil pengamatan pada **Gambar 4.8** dan **Gambar 4.9** menunjukkan bahwa penambahan biji kelor berbentuk serbuk maupun ekstrak pada kedua jenis lumpur menghasilkan pH yang cenderung stabil. Berdasarkan **Gambar 4.8** dan **Gambar 4.9**, selisih nilai pH yang terjadi sebesar 0,2 unit setelah perlakuan. Penelitian yang dilakukan oleh (Ndabingengsere *et al.*, 1995) menyebutkan bahwa penambahan biji kelor pada air yang diolah tidak menyebabkan penurunan atau peningkatan pH yang signifikan. Berbeda dengan penambahan koagulan kimia, seperti aluminium sulfat (alum) yang dapat menurunkan pH sekitar 4,2. Walaupun terjadi peningkatan dosis biji kelor, pH tetap stabil dan tidak menunjukkan perbedaan signifikan. Keunggulan kompetitif penggunaan biji kelor jika dibandingkan dengan bahan kimia seperti aluminium sulfat dan PAC yang biasanya dapat menurunkan pH dan meningkatkan konduktivitas listrik sebagai fungsi pelepasan proton (Batista *et al.*, 2023).

Penelitian serupa dilakukan oleh (Shan *et al.*, 2016) yang menyebutkan bahwa pH tidak berubah signifikan ketika biji kelor ditambahkan dalam sampel air sungai. pH yang diperoleh tetap stabil berada pada rentang aman (6,5-8,5) di berbagai konsentrasi penambahan biji kelor. Perubahan pH yang terjadi sekitar <0,2 unit setelah perlakuan. Menurut penelitian oleh Martin *et al.*, (2010), bahwa *Moringa oleifera* tidak bersifat asam maupun basa kuat sehingga tidak menyebabkan gangguan besar pada sistem. Kestabilan pH ini menguntungkan karena proses *dewatering* sangat sensitif terhadap perubahan pH. Jika pH tidak stabil dapat menyebabkan penurunan pembentukan flok serta dosis yang dibutuhkan menjadi lebih besar karena bahan pengkondisi tidak efektif sehingga menurunkan efisiensi *dewatering*.

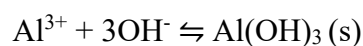


Gambar 4.8 Hasil Uji pH pada Lumpur Alum



Gambar 4.9 Hasil Uji pH pada Lumpur PAC

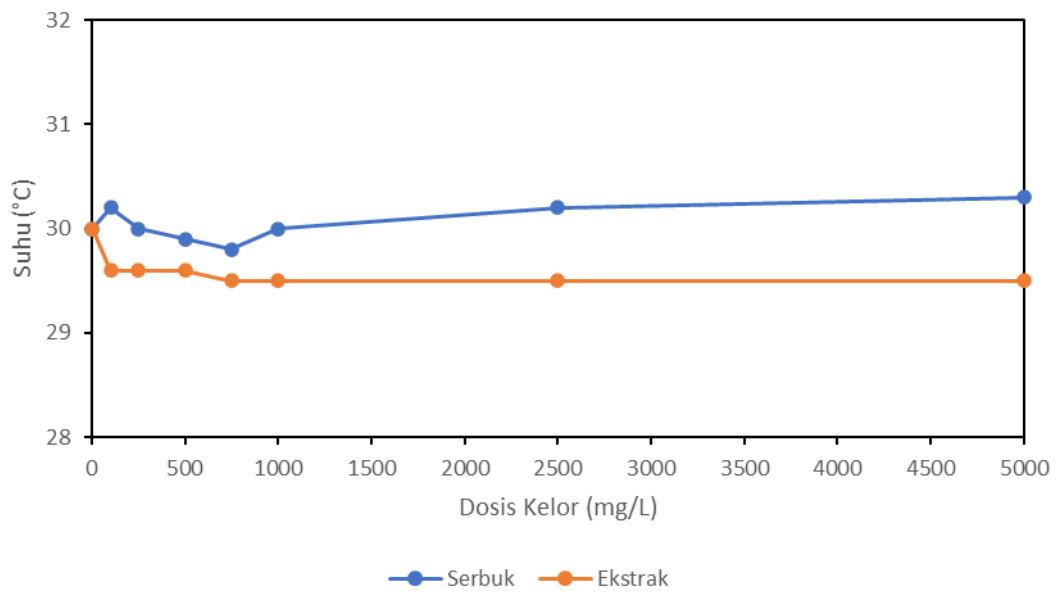
Nilai pH menjadi penting dalam proses pengkondisian lumpur karena sangat mempengaruhi kestabilan ion logam dalam larutan, khususnya ion aluminium (Al^{3+}) yang merupakan komponen utama dari bahan kimia alum dan PAC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pH atau alkalinitas tidak berubah signifikan sebelum dan sesudah penambahan biji kelor yang sejalan dengan penelitian oleh Ndabingengsere *et al.* (1995). Hal ini berbeda dengan koagulan anorganik seperti alum dan PAC yang umumnya menurunkan pH melalui pelepasan H^+ saat terjadi hidrolisis (Chales *et al.*, 2022). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penambahan biji kelor, baik dalam bentuk serbuk maupun ekstrak, tidak menyebabkan peningkatan pH yang cukup untuk mendorong terjadinya pengendapan senyawa aluminium hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Secara teoritis, pembentukan endapan ($\text{Al}(\text{OH})_3$) dikendalikan oleh konstanta hasil kali kelarutannya (K_{sp}) dengan reaksi sebagai berikut:



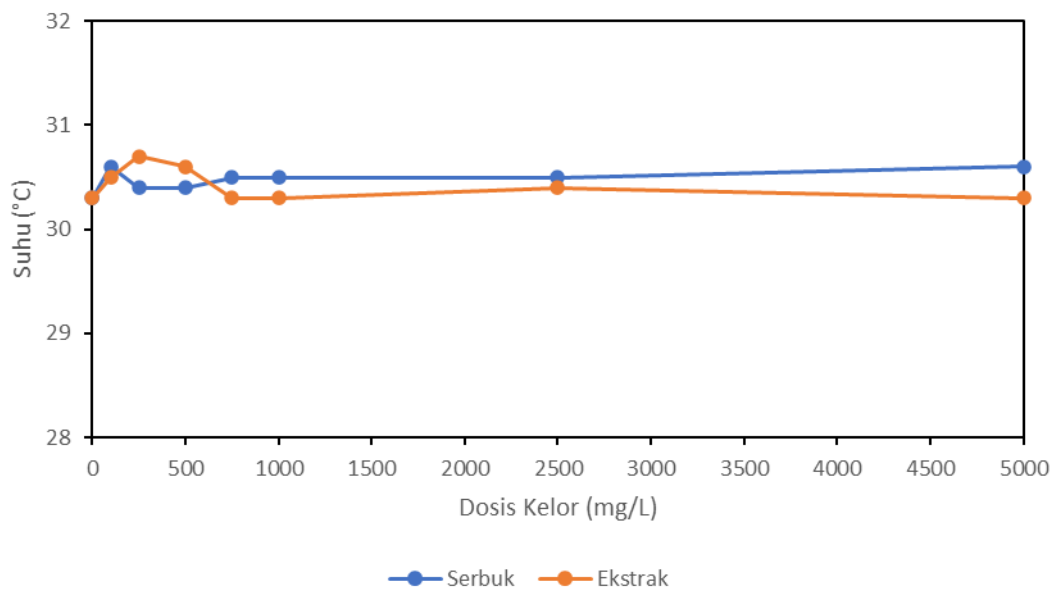
$$K_{sp} = [\text{Al}^{3+}][\text{OH}^-]^3$$

Nilai K_{sp} teoritis untuk $\text{Al}(\text{OH})_3$ adalah sekitar $1,3 \times 10^{-33}$. Hasil K_{sp} variasi lumpur alum dengan serbuk biji kelor pada dosis 0 mg/L, 100 mg/L, dan 5000 mg/L sebesar $1 \times 10^{-26,09}$, $1 \times 10^{-26,09}$, dan $1 \times 10^{-21,48}$. Nilai tersebut jauh lebih besar dari K_{sp} teoritis yang menunjukkan bahwa sistem telah mencapai kondisi jenuh dan memungkinkan terjadi pengendapan $\text{Al}(\text{OH})_3$ secara signifikan. Kondisi tersebut juga berlaku untuk variasi penelitian lainnya sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan biji kelor tidak memicu presipitasi kimia $\text{Al}(\text{OH})_3$ secara signifikan. Dengan demikian, mekanisme pengkondisian lumpur dalam penelitian ini lebih dominan melalui proses adsorpsi dan netralisasi muatan oleh senyawa aktif dalam biji kelor, bukan melalui pembentukan endapan akibat reaksi kelarutan. Namun, hasil karakterisasi SEM-XRD (**Gambar 4.27** hingga **Gambar 4.30**) tidak menunjukkan indikasi pembentukan padatan kristalin khas $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Penambahan biji kelor pada kedua jenis lumpur juga tidak mempengaruhi suhu berdasarkan **Gambar 4.10** dan **Gambar 4.11**.



Gambar 4.10 Hasil Uji Suhu pada Lumpur Alum



Gambar 4.11 Hasil Uji Suhu pada Lumpur PAC

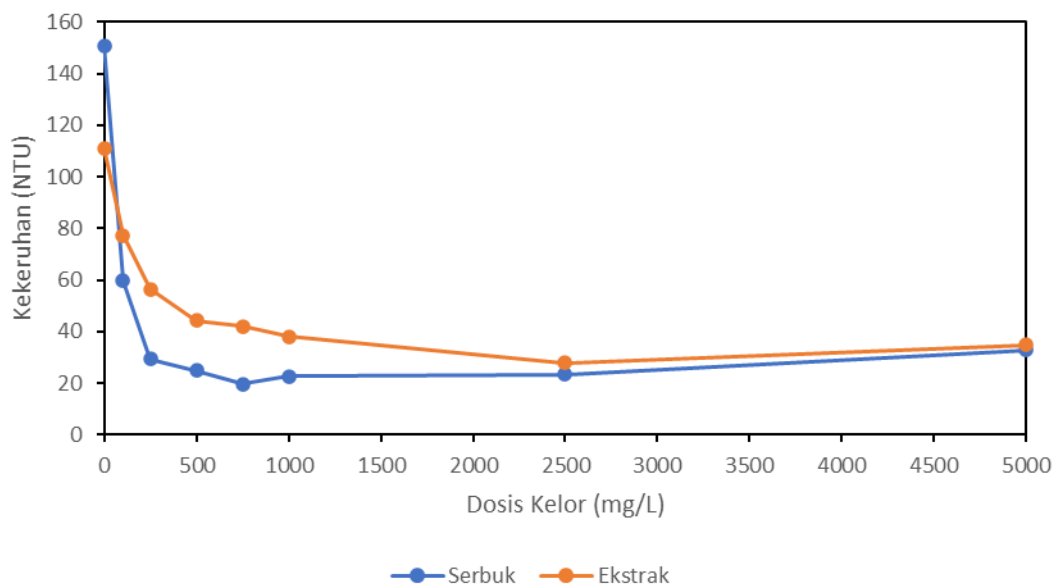
Hasil pengamatan pada **Gambar 4.10** dan **Gambar 4.11** menunjukkan bahwa penambahan biji kelor berbentuk serbuk maupun ekstrak pada kedua jenis lumpur cenderung menghasilkan suhu yang stabil. Menurut penelitian oleh (Ndabingengsere *et al.*, 1995) menyebutkan bahwa penambahan biji kelor pada air yang diolah tidak mempengaruhi suhu secara signifikan. Hal tersebut ditunjukkan dengan tidak adanya reaksi eksotermis atau endotermis pada sampel. Proses penambahan biji kelor dilakukan pada suhu ruang $\pm 25^{\circ}\text{C}$ (298°K) yang relatif stabil sehingga perubahan suhu tidak signifikan dan tidak mempengaruhi hasil pengkondisian. Menurut Martin *et al.*, (2010), menyebutkan bahwa suhu selama proses berlangsung dijaga pada kondisi suhu ruang (sekitar $25 - 28^{\circ}\text{C}$) supaya tidak mempengaruhi

viskositas lumpur dan laju reaksi antara lumpur dan biji kelor. Namun, penelitian dilakukan pada kondisi suhu ruang laboratoium sekitar 29-31°C mengingat iklim tropis Indonesia dengan suhu udara rata-rata harian yang cenderung stabil.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Tunggolou & Payus (2017), menunjukkan bahwa penggunaan biji kelor sebagai koagulan dalam proses pemurnian air tidak menyebabkan perubahan signifikan pada pH dan suhu air. Suhu akhir setelah penambahan biji kelor tetap dalam kisaran suhu kamar normal (22,07 °C hingga 24,97 °C). Hal ini menunjukkan bahwa biji kelor merupakan bahan pengkondisi yang lebih aman dan ramah lingkungan dibandingkan bahan kimia, seperti aluminium sulfat maupun *Poly Alumunium Sulfat* (PAC).

4.2.3 Kekeruhan

Penelitian dilakukan terhadap supernatan lumpur setelah pengkondisian menggunakan biji kelor. Supernatan yang dianalisis adalah hasil dari proses sedimentasi selama 30 menit setelah proses pencampuran biji kelor. Pengujian dilakukan pada berbagai dosis dan bentuk biji kelor terhadap masing-masing jenis lumpur. Hasil pengujian kekeruhan dari kedua jenis lumpur disajikan pada **Gambar 4.12**.

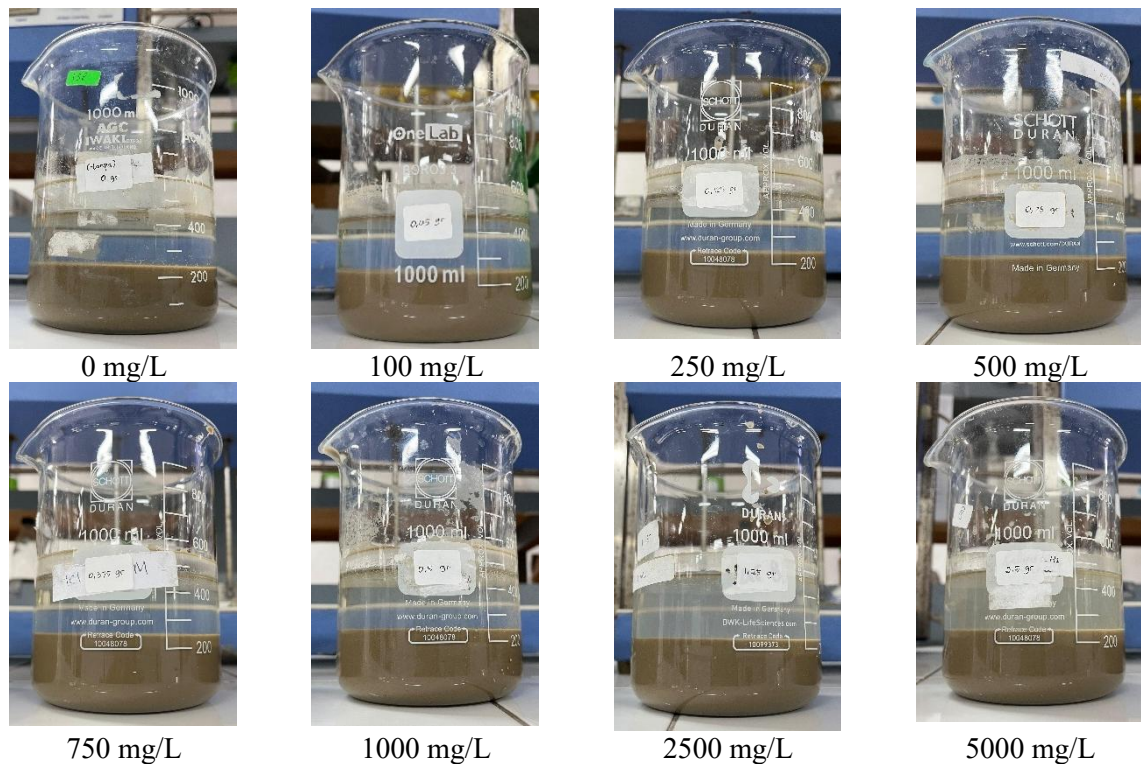


Gambar 4.12 Hasil Uji Kekeruhan Lumpur Alum

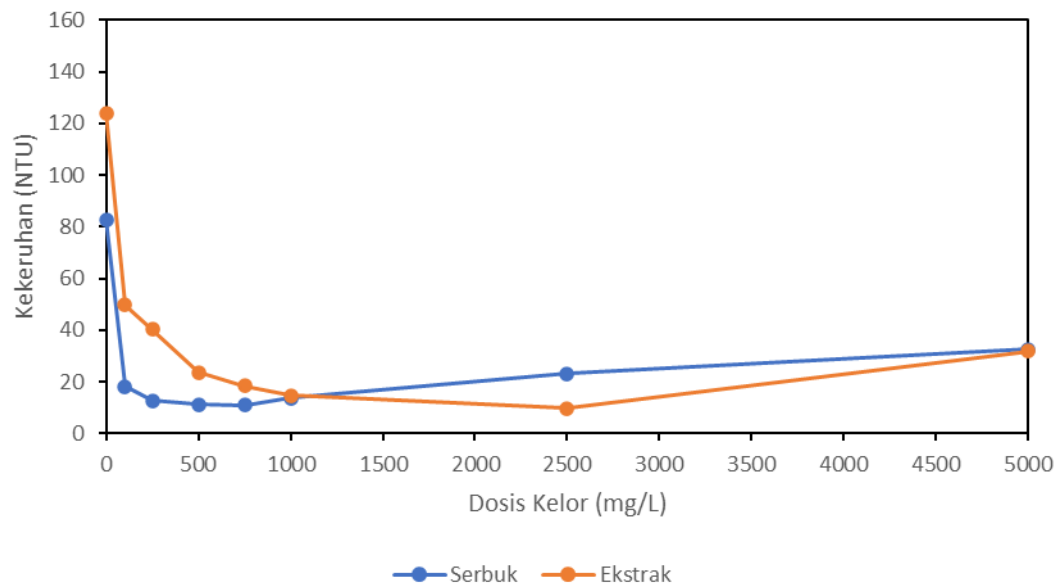
Berdasarkan **Gambar 4.12**, nilai kekeruhan awal lumpur mengandung alum (tanpa perlakuan biji kelor) adalah 151 NTU. Setelah penambahan serbuk biji kelor, nilai kekeruhan menurun signifikan hingga mencapai nilai terendah sebesar 19,50 NTU. Pola penurunan terlihat konsisten dari dosis 100 mg/L hingga 750 mg/L, kemudian terjadi sedikit kenaikan kembali hingga dosis 5000 mg/L, yang menunjukkan indikasi overdosis bahan pengkondisi (**Gambar 4.13**). Kenaikan kekeruhan disebabkan tingginya dosis biji kelor sehingga zat aktif biji kelor tidak lagi memperbesar ukuran flok, melainkan berada pada kondisi jenuh dan meningkatkan pengotor (Gea *et al.*, 2019).

Sementara itu, dalam perlakuan ekstrak biji kelor juga terjadi penurunan kekeruhan hingga mencapai nilai minimum sebesar 23,80 NTU pada dosis 2500 mg/L, meskipun penurunannya tidak seefektif serbuk pada dosis tertentu. Hal tersebut sejalan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh (Ndabingengsere *et al.*, 1995), bahwa protein larut air dalam biji kelor mampu menetralkan muatan partikel dan menginduksi pembentukan flok, namun bentuk

padatan (serbuk) memiliki kemampuan adsorpsi dan flokulasi yang lebih kuat karena tidak mengalami degradasi dalam pelarutan.



Gambar 4.13 Pengamatan Fisik Uji Kekeruhan Lumpur Alum



Gambar 4.14 Hasil Uji Kekeruhan pada Lumpur PAC

Sama halnya dengan lumpur alum, berdasarkan **Gambar 4.14** menunjukkan bahwa nilai kekeruhan awal lumpur PAC sebelum perlakuan adalah 82,80 NTU. Setelah ditambahkan serbuk biji kelor, nilai kekeruhan menurun drastis hingga 10,82 NTU pada dosis 750 mg/L.

Kemudian, sedikit meningkat kembali pada dosis yang lebih tinggi, yaitu pada dosis 1000 mg/L hingga 5000 mg/L yang juga menunjukkan adanya overdosis. Sementara itu, dalam perlakuan ekstrak biji kelor juga terjadi penurunan kekeruhan hingga mencapai nilai minimum sebesar 9,72 NTU pada dosis 9,72 mg/L meskipun penurunannya tidak seefektif serbuk pada dosis tertentu.

Ketika proses pengadukan sampel bersama biji kelor dengan *jar test* terjadi interaksi dengan partikel koloid yang bermuatan positif dan negatif. Interaksi tersebut menyebabkan gangguan pada kestabilan partikel penyebab kekeruhan. Akibatnya, partikel koloid bergabung membentuk ukuran yang lebih besar (flok) dan akhirnya mengendap (Aras & Asriani, 2021). Dalam penelitian oleh Nabila *et al.*, (2024) bahwa penggunaan biji kelor menunjukkan efisiensi penghilangan kekeruhan sebesar 87,73% dimana mencerminkan efektivitas tinggi dari bahan alami. Penelitian yang telah dilakukan oleh Shan *et al.*, (2016), penggunaan serbuk biji kelor menunjukkan kemampuan yang baik dalam mengurangi kekeruhan air, dengan efisiensi penghilangan kekeruhan mencapai lebih dari 90% pada dosis optimal.

4.2.4 *Total Solids (TS)*

Penelitian ini dilakukan pada supernatan sampel yang telah diendapkan selama 30 menit. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan biji kelor (*Moringa oleifera*) pada lumpur yang mengandung alum dan PAC dapat menurunkan nilai *Total Solids (TS)* secara bertahap sesuai peningkatan dosis. Hasil uji TS disajikan pada grafik dalam **Gambar 4.15** dan **Gambar 4.16**.

Berdasarkan **Gambar 4.15**, terlihat bahwa nilai TS pada lumpur dengan penambahan serbuk biji kelor cenderung meningkat seiring dengan kenaikan dosis. Nilai TS meningkat dari 6180 mg/L (tanpa penambahan biji kelor) menjadi 10530 mg/L pada dosis 5000 mg/L. Kecenderungan ini menunjukkan bahwa penambahan serbuk biji kelor menambah kandungan padatan dalam lumpur. Sementara, hasil setelah penambahan ekstrak biji kelor menghasilkan peningkatan TS yang lebih curam, dari 7260 mg/L menjadi 7550 mg/L. Menurut Batista *et al.*, (2023) bahwa meningkatnya nilai TS menunjukkan adanya peningkatan padatan pada sampel uji yang dapat disebabkan oleh padatan organik dalam biji kelor. Biji kelor mengandung sekitar 36,7% protein, 34,6% lipid, dan 5% karbohidrat yang ketika digunakan untuk pengondisian tanpa langkah lanjutan pemurnian protein kationik akan meningkatkan padatan organik tergantung pada dosis yang diberikan.

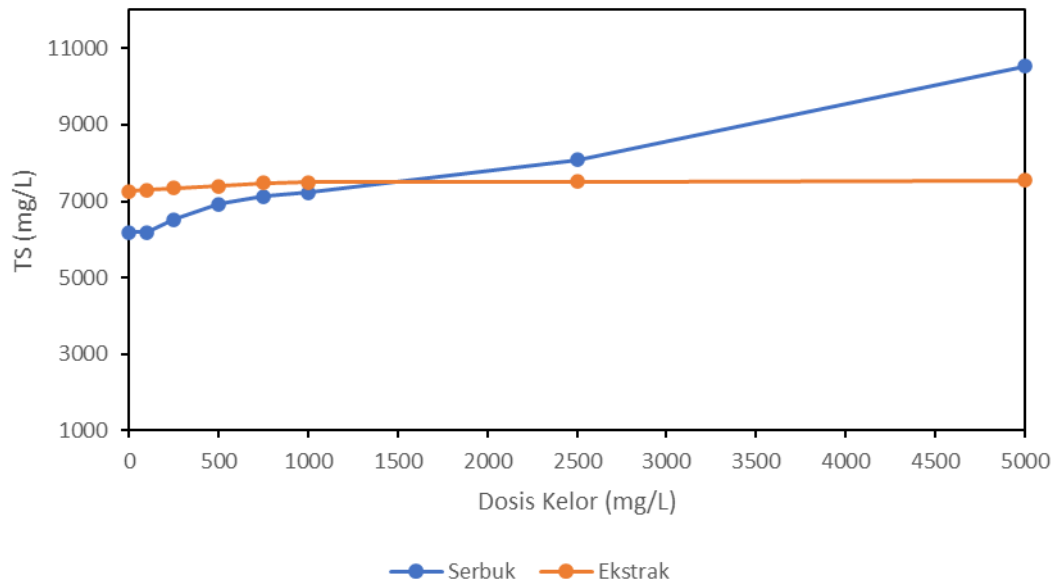
Hasil serupa juga tampak pada lumpur yang mengandung PAC. Berdasarkan **Gambar 4.16** menunjukkan peningkatan drastis nilai TS meningkat dari nilai TS 2310 mg/L menjadi 6780 mg/L dengan peningkatan dosis serbuk biji kelor. Sementara itu, penggunaan ekstrak biji kelor memberikan peningkatan nilai TS dari 2850 mg/L menjadi 3630 mg/L. Kenaikan yang lebih kecil ini konsisten dengan hasil pada lumpur alum, yang menunjukkan bahwa ekstrak biji kelor memberikan efek yang lebih ringan terhadap peningkatan total padatan dibandingkan serbuk. Penelitian yang telah dilakukan oleh Gold *et al.*, (2016), menunjukkan bahwa penggunaan ekstrak biji kelor dalam pengentalan lumpur tinja dapat meningkatkan kandungan padatan. Oleh karena itu, biji kelor mentah harus digunakan dengan hati-hati pada dosis tinggi untuk mencegah keberadaan organik sisa dalam air.

4.2.5 *Total Suspended Solids (TSS)*

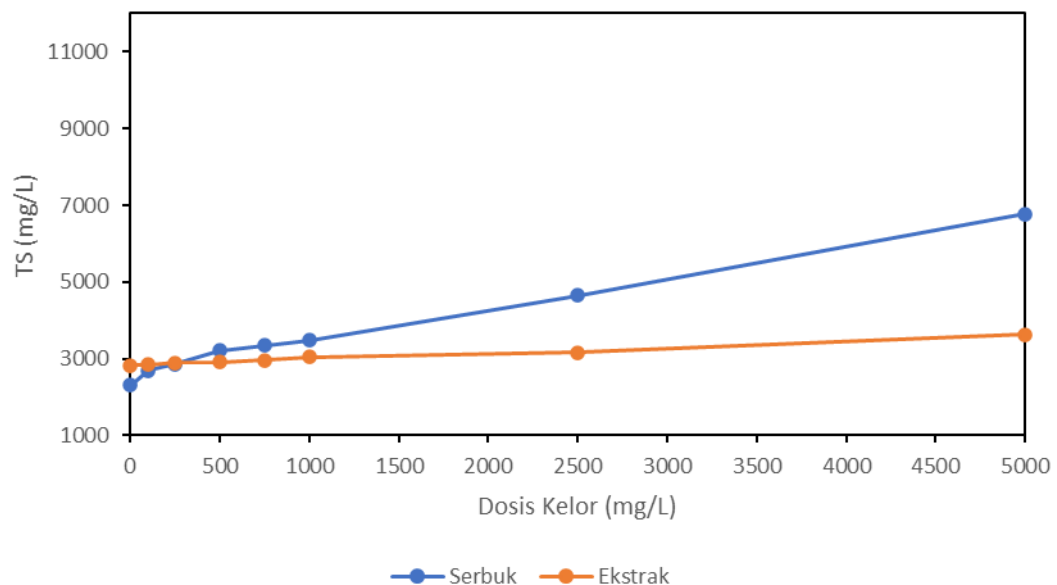
Sampel yang merupakan supernatan hasil pengendapan selama 30 menit setelah pengadukan dengan biji kelor, kemudian diambil sebanyak 10 mL untuk diuji TSS. Hasil uji TSS disajikan menjadi grafik pada **Gambar 4.17** dan **Gambar 4.18**.

Berdasarkan **Gambar 4.16**, kadar TSS awal lumpur mengandung alum sebesar 140 mg/L (tanpa penambahan biji kelor). Setelah penambahan serbuk biji kelor, TSS menurun

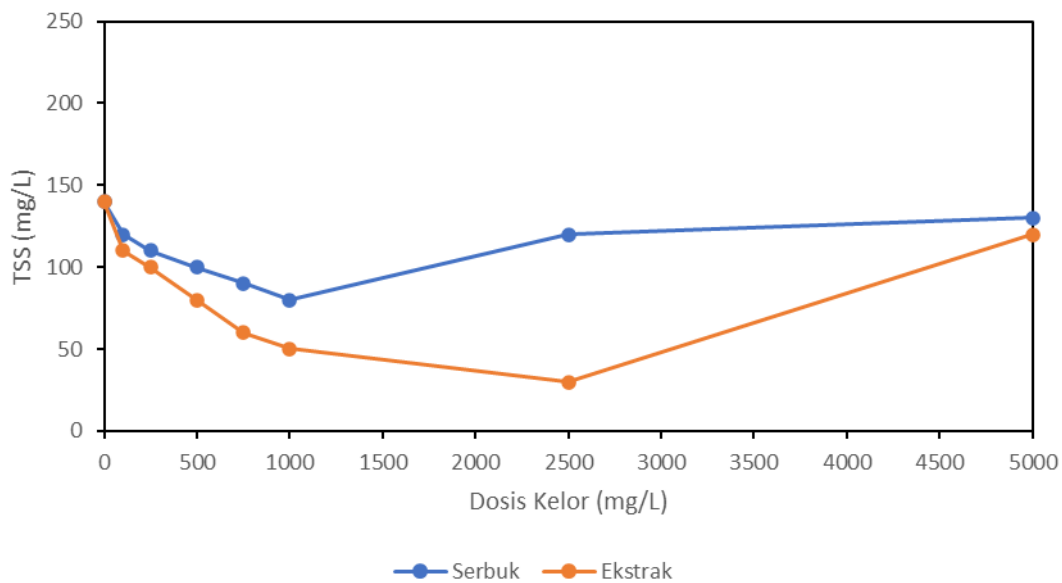
hingga titik terendah 80 mg/L pada dosis 1000 mg/L, lalu meningkat kembali menjadi 120 mg/L pada dosis 2500 mg/L. Penurunan lebih signifikan terjadi pada penambahan ekstrak biji kelor, dimana TSS menurun drastis hingga 30 mg/L pada dosis 2500 mg/L, sebelum kembali naik menjadi 120 mg/L pada dosis 5000 mg/L. Penurunan nilai TSS menunjukkan bahwa bahan pengkondisi biji kelor yang bermuatan positif berinteraksi dengan partikel-partikel bermuatan negatif dalam lumpur sehingga terjadi mekanisme adsorpsi yang menyebabkan pembentukan flok (Gea *et al.*, 2019).



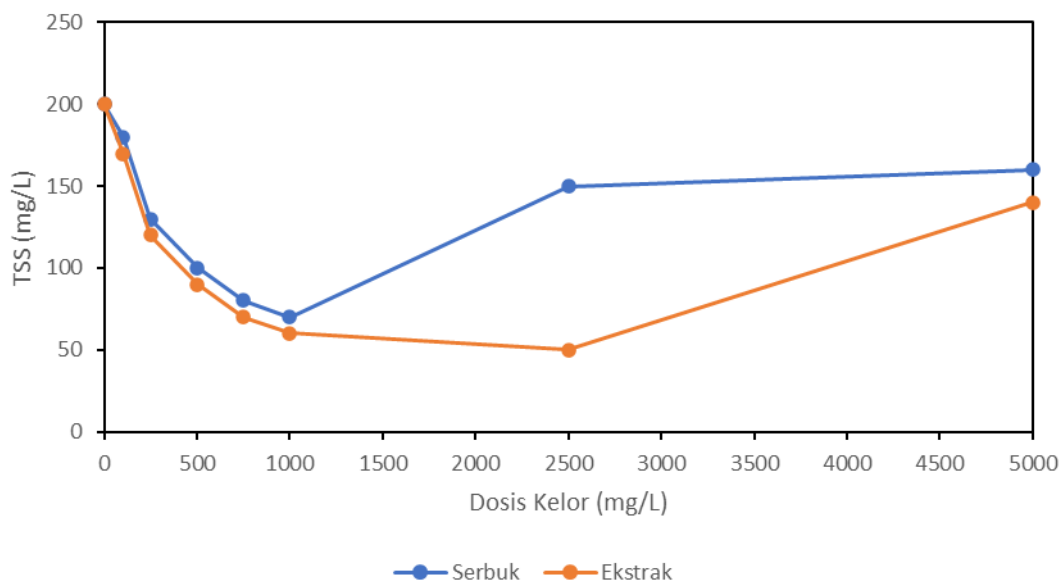
Gambar 4.15 Hasil Uji TS pada Lumpur Alum



Gambar 4.16 Hasil Uji TS pada Lumpur PAC



Gambar 4.17 Hasil Uji TSS pada Lumpur Alum



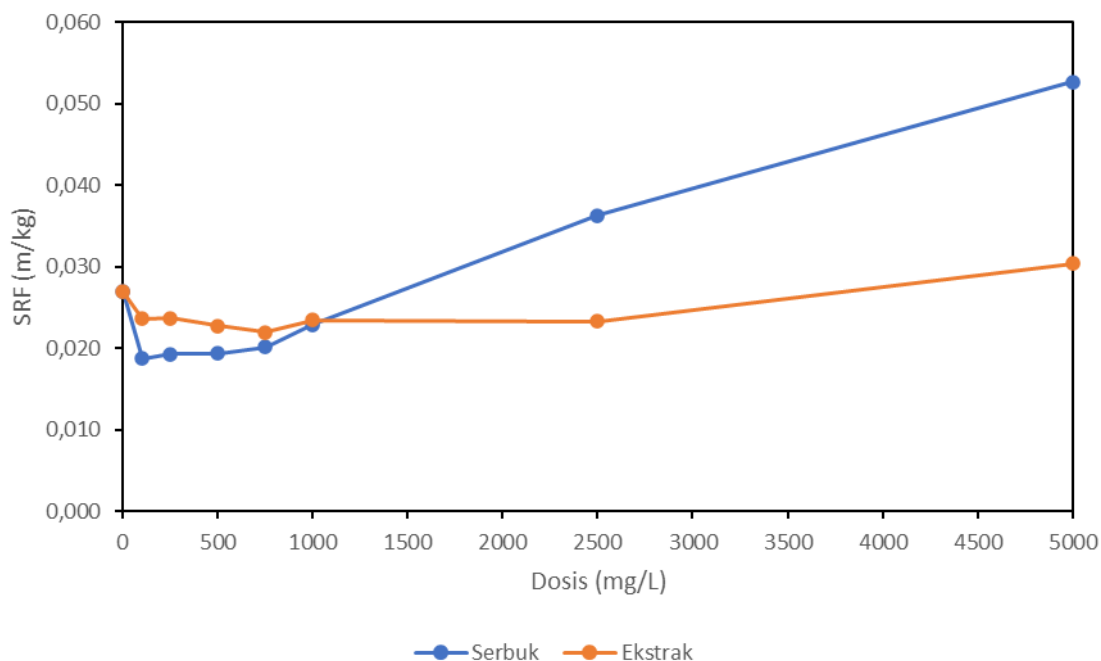
Gambar 4.18 Hasil Uji TSS pada Lumpur PAC

Tren yang sama terlihat pada lumpur mengandung PAC dalam **Gambar 4.18**. Kadar TSS awal sebesar 200 mg/L menurun secara signifikan hingga titik terendah masing-masing 70 mg/L (serbuk) dan 50 mg/L (ekstrak) pada dosis 1000 mg/L dan 2500 mg/L. Namun, pada dosis serbuk biji kelor 2500 mg/L, TSS meningkat kembali menjadi 150 mg/L. Pada dosis ekstrak biji kelor 5000 mg/L, TSS meningkat menjadi 140 mg/L. Peningkatan nilai TSS pada kedua sampel lumpur disebabkan karena penambahan dosis kelor yang berlebih sehingga flok semakin bertambah untuk tidak mengendap. Hal tersebut mengakibatkan efektifitas penurunan kadar TSS semakin meningkat (Harahap *et al.*, 2022). Penambahan dosis biji kelor yang berlebih mengakibatkan partikel koloid yang telah terbentuk menjadi tidak stabil karena tidak

terdapat ruang untuk menghubungkan partikel. Oleh karena itu, proses pencampuran biji kelor terhadap lumpur tidak bekerja maksimal sehingga nilai TSS semakin meningkat ketika biji kelor melebihi dosis optimum (Bangun *et al.*, 2013).

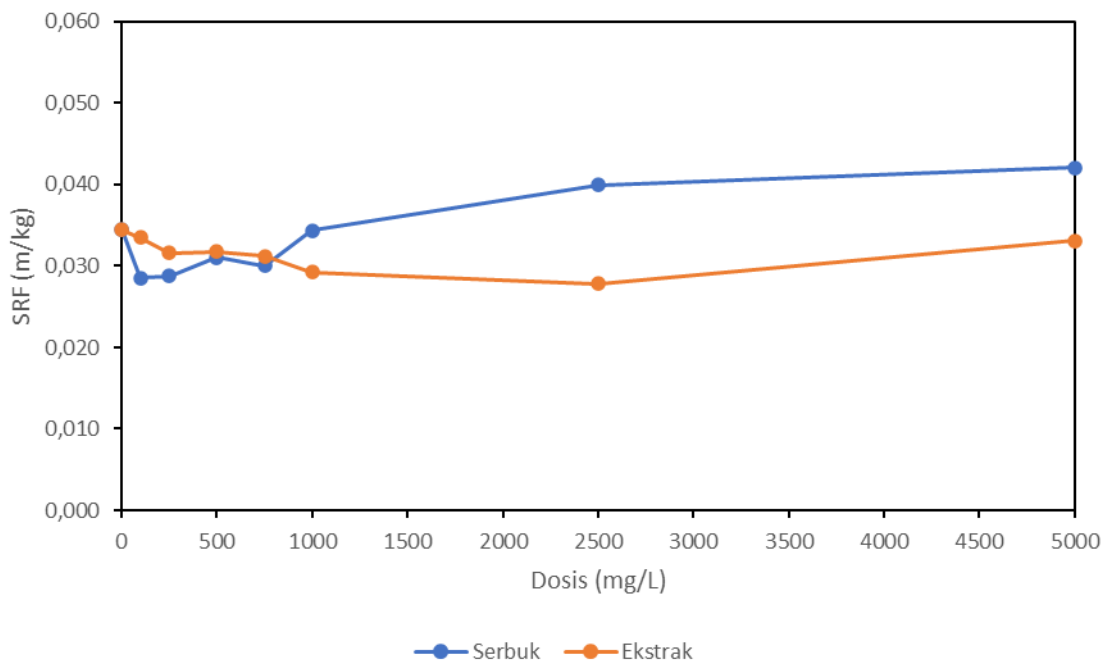
4.2.6 *Specific Resistance to Filtration (SRF)*

Analisis dilakukan pada sampel yang telah homogen setelah melewati proses pencampuran dengan biji kelor. Hasil pengujian SRF disajikan pada **Gambar 4.19** dan **Gambar 4.20**.



Gambar 4.19 Hasil Uji SRF pada Lumpur Alum

Berdasarkan **Gambar 4.19** dan **Gambar 4.20**, terlihat bahwa penambahan serbuk biji kelor pada lumpur yang mengandung koagulan Alum dan PAC menunjukkan peningkatan nilai SRF seiring bertambahnya dosis. Pada lumpur alum dengan penambahan serbuk biji kelor (**Gambar 4.19**), nilai SRF terendah diperoleh pada dosis 100 mg/L dan 250 mg/L, yaitu sebesar 0,019 m/kg. Nilai SRF kemudian meningkat secara signifikan pada dosis 2500 mg/L dan mencapai nilai tertinggi 0,053 m/kg pada dosis 5000 mg/L. Tren yang sama juga tampak pada lumpur PAC dengan penambahan serbuk biji kelor (**Gambar 4.20**), di mana SRF meningkat dari 0,029 m/kg (100 mg/L) menjadi 0,042 m/kg (5000 mg/L). Berbeda dengan serbuk, pemberian ekstrak biji kelor menunjukkan hasil yang relatif lebih stabil dan rendah. Pada lumpur dengan alum dengan penambahan ekstrak biji kelor (**Gambar 4.19**), nilai SRF berkisar antara 0,022–0,030 m/kg, dengan nilai terendah pada dosis 250 mg/L. Hal serupa juga terlihat pada lumpur dengan PAC dengan penambahan ekstrak biji kelor (**Gambar 4.20**), di mana nilai SRF terendah terjadi pada dosis 250 mg/L, sebesar 0,028 m/kg. Peningkatan nilai SRF pada dosis tinggi disebabkan oleh terbentuknya flok yang terlalu besar dan padat sehingga menyulitkan aliran air keluar dari lumpur saat proses filtrasi. Hal ini didukung oleh hasil penelitian oleh Ndabigengesere *et al.*, (1995), yang menyatakan bahwa dosis *Moringa oleifera* yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penggumpalan berlebih dan menurunkan efisiensi dewatering.



Gambar 4.20 Hasil Uji SRF pada Lumpur PAC

Berdasarkan hasil pengujian terhadap lumpur yang mengandung alum, diperoleh tiga dosis serbuk dan ekstrak biji kelor dengan nilai SRF terendah sebagai berikut:

1. Serbuk biji kelor: 100 mg/L (0,019 m/kg), 250 mg/L (0,019 m/kg), dan 500 mg/L (0,019 m/kg).
2. Ekstrak biji kelor: 500 mg/L (0,023 m/kg), 750 mg/L (0,022 m/kg), dan 1000 mg/L (0,023 m/kg).

Dosis 1000 mg/L dan 2500 mg/L pada lumpur dengan ekstrak biji kelor sama-sama memiliki nilai SRF sebesar 0,023 m/kg, namun dosis 1000 mg/L dipilih karena menghasilkan t/V yang relatif lebih tinggi di awal dan menambah dosis menjadi 2500 mg/L akan lebih banyak membutuhkan bahan karena tidak memberikan manfaat tambahan. Oleh karena itu, dosis 1000 mg/L lebih baik dibandingkan 2500 mg/L.

Sementara itu, pada lumpur yang mengandung PAC, tiga dosis terpilih berdasarkan nilai SRF terendah adalah:

1. Serbuk biji kelor: 100 mg/L (0,029 m/kg), 250 mg/L (0,029 m/kg), dan 750 mg/L (0,030 m/kg).
2. Ekstrak biji kelor: 750 mg/L (0,031 m/kg), 1000 mg/L (0,029 m/kg), dan 2500 mg/L (0,028 m/kg).

Tiga dosis masing-masing tersebut digunakan dalam analisis lanjutan berupa pengukuran zeta potensial (subbab 4.2.9), guna mengkaji keterkaitan antara kestabilan muatan partikel dengan kemampuan pengondisian lumpur.

4.2.7 *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX)*

Pemilihan sampel uji SEM-EDX didasarkan pada tiga kondisi utama, yaitu lumpur tanpa penambahan biji kelor, lumpur dengan penambahan biji kelor, dan ekstrak biji kelor untuk menggambarkan perbedaan morfologi permukaan dan komposisi unsur sebelum dan setelah penambahan biji kelor. Dosis tidak divariasikan secara langsung dalam uji ini, karena SEM-

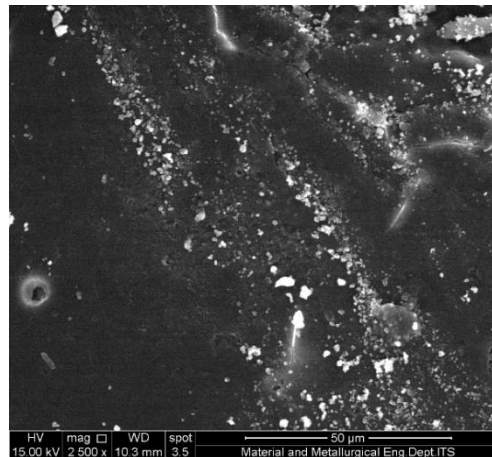
EDX ditujukan untuk melihat keberadaan pengaruh material baru (biji kelor), bukan untuk menilai efek perubahan konsentrasinya.

Hasil uji SEM ekstrak biji kelor ditunjukkan pada **Gambar 4.21**, sementara uji dari lumpur alum disajikan pada **Gambar 4.22** (a) dan **Gambar 4.22** (b) dan lumpur mengandung PAC disajikan pada **Gambar 4.23** (a) dan **Gambar 4.23** (b). Warna hitam dan putih pada gambah hasil SEM (*Scanning Electron Microscope*) menunjukkan perbedaan komposisi unsur dan sifat permukaan sampel yang diamati. Area putih atau terang biasanya menunjukkan keberadaan unsur dengan nomor atom tinggi (seperti logam berat atau mineral) yang memantulkan lebih banyak elektron balik (*backscattered electrons*) sehingga tampak lebih cerah. Sebaliknya, area hitam atau gelap menandakan keberadaan bahan dengan nomor atom rendah, seperti bahan organik (karbon dan oksigen) yang memantulkan lebih sedikit elektron dan tampak lebih gelap pada citra SEM (Goldstein *et al.*, 2017). Dalam konteks lumpur alum atau PAC yang dicampur biji kelor, area putih merepresentasikan partikel anorganik seperti aluminium dan silikon, sedangkan area hitam menandakan lapisan organik dari biji kelor yang menutupi permukaan partikel tersebut (Ndabingengsere & Narasiah, 1988).

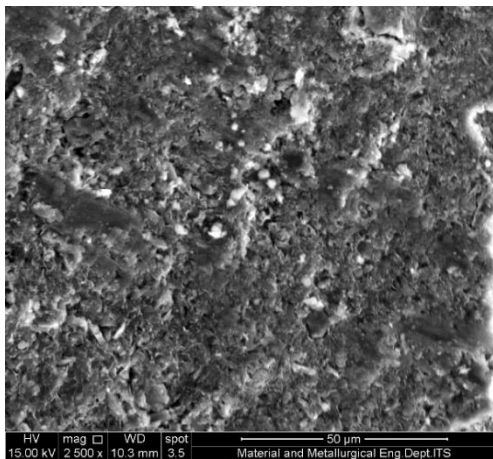
Hasil SEM ekstrak biji kelor (**Gambar 4.21**) menunjukkan permukaan yang tidak rata dengan adanya agregat dan partikel berukuran mikro. Struktur permukaan yang kasar dan berpori ini menandakan adanya senyawa organik aktif, seperti protein dan polisakarida yang berpotensi tinggi sebagai agen pengkondisi. Permukaan yang luas dan berpori ini memungkinkan terjadinya adsorpsi dan *bridging* terhadap partikel tersuspensi dalam air (Ndabingengsere & Narasiah, 1998). Ekstrak biji kelor dominan pada warna hitam atau gelap yang menunjukkan dominan senyawa organik dari biji kelor, seperti karbon (54,47%), oksigen (26,76%), dan nitrogen (12,87%) yang dibuktikan dari hasil EDX pada **Tabel 4.2**.

Berdasarkan **Gambar 4.22** (a) menunjukkan permukaan lumpur alum tanpa biji kelor tampak lebih homogen dan relatif halus dengan sedikit agregasi partikel. Struktur ini menandakan bahwa partikel-partikel hasil koagulasi dengan alum cenderung membentuk flok yang kompak, namun kurang berpori. Hal ini sesuai dengan karakteristik alum sebagai koagulan kimia yang membentuk flok melalui netralisasi muatan, namun kurang efektif dalam *bridging* antar partikel (Achak *et al.*, 2019). Setelah penambahan biji kelor (**Gambar 4.22** (b)), permukaan lumpur alum menjadi lebih kasar dan tampak lebih banyak agregat berukuran besar. Terlihat adanya struktur flok yang lebih berpori, relatif padat, dan kompak yang menandakan bahwa protein kationik dari biji kelor mampu mengikat partikel tersuspensi dan alum, membentuk flok yang lebih besar dan mudah mengendap (Ndabingengsere & Narasiah, 1998). Lumpur alum setelah penambahan biji kelor lebih gelap daripada lumpur alum sebelum penambahan biji kelor yang menunjukkan adanya tambahan senyawa organik dari ekstrak biji kelor. Hal tersebut dibuktikan dengan hasil EDX (**Tabel 4.2**) bahwa terjadi peningkatan senyawa organik karbon sebanyak 2,46%, oksigen sebanyak 0,27%, dan nitrogen sebanyak 0,11%. Hasil SEM pada **Gambar 4.22** (a) dan **Gambar 4.22** (b) juga terdapat bagian berwarna putih atau terang yang menunjukkan dominan senyawa anorganik seperti Al dan Si.

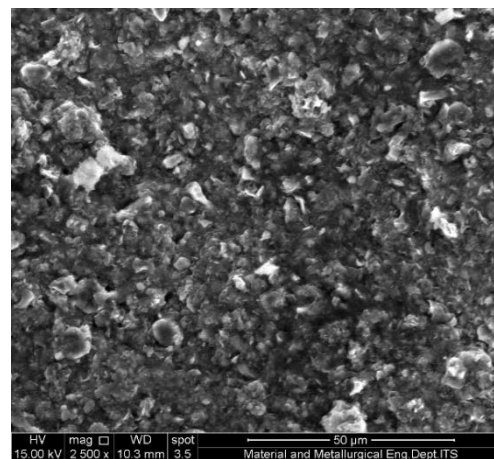
Pada **Gambar 4.22** (a) menunjukkan permukaan yang terlihat padat, kompak, dan partikel flok yang terbentuk cenderung kecil serta terdistribusi merata. Struktur ini menandakan mekanisme koagulasi yang dominan melalui netralisasi muatan oleh PAC, namun dengan keterbatasan dalam membentuk flok besar (Achak *et al.*, 2019).



Gambar 4.21 Hasil Uji SEM Ekstrak Biji Kelor dengan Perbesaran 2500x



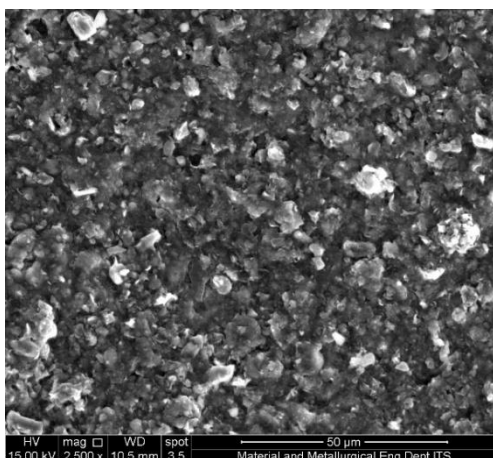
(a)



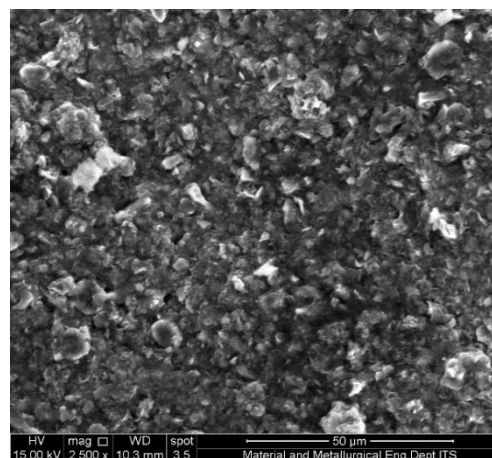
(b)

Gambar 4.22 Hasil Uji SEM Lumpur Alum dengan Perbesaran 2500x

(a) Tanpa Biji Kelor (b) Dengan Biji Kelor



(a)



(b)

Gambar 4.23 Hasil Uji SEM Lumpur PAC dengan Perbesaran 2500x

(a) Tanpa Biji Kelor (b) Dengan Biji Kelor

Setelah penambahan biji kelor (**Gambar 4.22 (b)**) menunjukkan permukaan lumpur PAC berubah menjadi lebih kasar dengan flok yang lebih besar dan berpori. Terlihat adanya agregasi partikel yang lebih masif, menandakan terjadinya bridging antara senyawa organik biji kelor dan PAC. Struktur ini sangat mendukung proses sedimentasi karena flok yang lebih besar dan berpori lebih mudah mengendap (Heredia & Martin, 2009). Lumpur PAC setelah penambahan biji kelor lebih gelap daripada lumpur PAC sebelum penambahan biji kelor yang menunjukkan adanya tambahan senyawa organik dari ekstrak biji kelor. Hal tersebut dibuktikan dengan hasil EDX (**Tabel 4.2**) bahwa terjadi peningkatan senyawa organik karbon sebanyak 2,44% dan nitrogen sebanyak 0,7%. Hasil SEM pada **Gambar 4.22 (a)** dan **Gambar 4.22 (b)** juga terdapat bagian berwarna putih atau terang yang menunjukkan dominan senyawa anorganik seperti Al dan Si.

Perbedaan visual permukaan pada uji SEM sejalan dengan perubahan komposisi kimia pada masing-masing sampel, yang dapat ditelusuri lebih lanjut melalui analisis kuantitatif unsur menggunakan EDX. Pada **Tabel 4.2** menyajikan presentase atomik (At%) dari unsur-unsur utama yang terdeteksi melalui analisis EDX dengan perbesaran 2500x pada masing-masing sampel.

Tabel 4.3 Hasil Uji EDX

Unsur	Komposisi Unsur Sampel dalam At%				
	Ekstrak Biji Kelor	Lumpur Alum tanpa Biji Kelor	Lumpur Alum + Biji Kelor	Lumpur PAC tanpa Biji Kelor	Lumpur PAC + Biji Kelor
C	54,47	04,68	07,14	11,65	14,09
N	12,87	01,69	01,80	03,12	03,82
O	26,76	56,97	57,24	55,89	53,79
Mg	00,61	01,71	00,87	00,99	01,02
Al	00,50	11,26	12,30	09,79	09,74
Si	00,55	20,55	17,40	15,53	14,74
P	01,31	00,40	00,46	00,42	00,53
Cl	00,24	00,09	00,09	00,10	00,04
K	00,28	00,56	00,29	00,27	00,29
Ca	00,28	00,67	00,77	01,01	00,91
Fe	00,17	01,43	01,64	01,21	01,03

Berdasarkan **Tabel 4.2** menunjukkan komposisi unsur dari 5 (lima) sampel, yaitu ekstrak biji kelor, lumpur alum tanpa biji kelor, lumpur alum + biji kelor, lumpur PAC tanpa biji kelor, dan lumpur PAC + biji kelor. Hasilnya memperlihatkan bahwa ekstrak biji kelor didominasi oleh unsur karbon (C) sebesar 54,47%, oksigen (O) sebesar 26,76%, dan nitrogen (N) sebesar 12,87%. Kandungan karbon dan nitrogen yang tinggi menunjukkan karakteristik bahan organik yang kuat dari biji kelor, sesuai dengan sifat alami tanaman tersebut sebagai sumber protein dan senyawa organik aktif (Harahap *et al.*, 2022). Komposisi unsur karbon (C) mengalami peningkatan signifikan pada sampel lumpur yang ditambahkan biji kelor, baik dalam lumpur mengandung alum maupun PAC. Setelah penambahan biji kelor, komposisi C pada lumpur alum meningkat dari 4,68% menjadi 7,14% dan pada lumpur PAC meningkat dari 11,65% menjadi 14,09%. Peningkatan ini mendukung temuan visual SEM bahwa struktur lumpur menjadi lebih berpori akibat kontribusi bahan organik. Penambahan biji kelor pada lumpur alum dan PAC menyebabkan sedikit perubahan pada unsur logam. Hal ini menunjukkan

adanya interaksi antara senyawa organik dari biji kelor dan koagulan kimia yang membentuk kompleks baru yang tercermin dari perubahan komposisi unsur (Helen *et al.*, 2012).

Selain itu, penurunan kandungan aluminium (Al) dan silikon (Si) setelah penambahan kelor juga teramati. Misalnya, pada lumpur PAC, kandungan Al turun dari 20,79% menjadi 19,64%, dan Si turun dari 15,53% menjadi 14,74%. Penurunan ini dapat diartikan bahwa sebagian besar permukaan partikel yang semula didominasi oleh logam dan silika kini tertutup oleh lapisan senyawa organik dari biji kelor. Hal ini diperkuat oleh peningkatan kandungan nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) pada sampel mengandung kelor, yang merupakan elemen khas dari biomassa nabati (Abaliwano *et al.*, 2008). Analisis ini sejalan dengan penelitian Ndabigengesere & Narasiah (1998), yang menyebutkan bahwa biji kelor mengandung protein kationik yang dapat menempel pada partikel tersuspensi dan menggantikan peran koagulan kimia. Senyawa aktif ini bekerja dengan mekanisme adsorpsi dan *bridging* menyebabkan terbentuknya flok yang lebih besar. Selain itu, menurut Beltrán-Heredia *et al.* (2009), peningkatan kandungan karbon (C) dan nitrogen (N) merupakan indikator utama bahwa pengkondisi alami ikut berinteraksi dalam permukaan flok dan memengaruhi struktur agregat yang terbentuk.

Dengan demikian, uji SEM-EDX menunjukkan bahwa penambahan biji kelor secara signifikan memengaruhi struktur dan komposisi lumpur hasil pengkondisian. Kehadiran unsur-unsur organik dari biji kelor memperkaya matriks lumpur dengan senyawa aktif yang berperan dalam pembentukan flok, serta menunjukkan potensi biji kelor sebagai koagulan alami yang efektif dan ramah lingkungan.

4.2.8 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

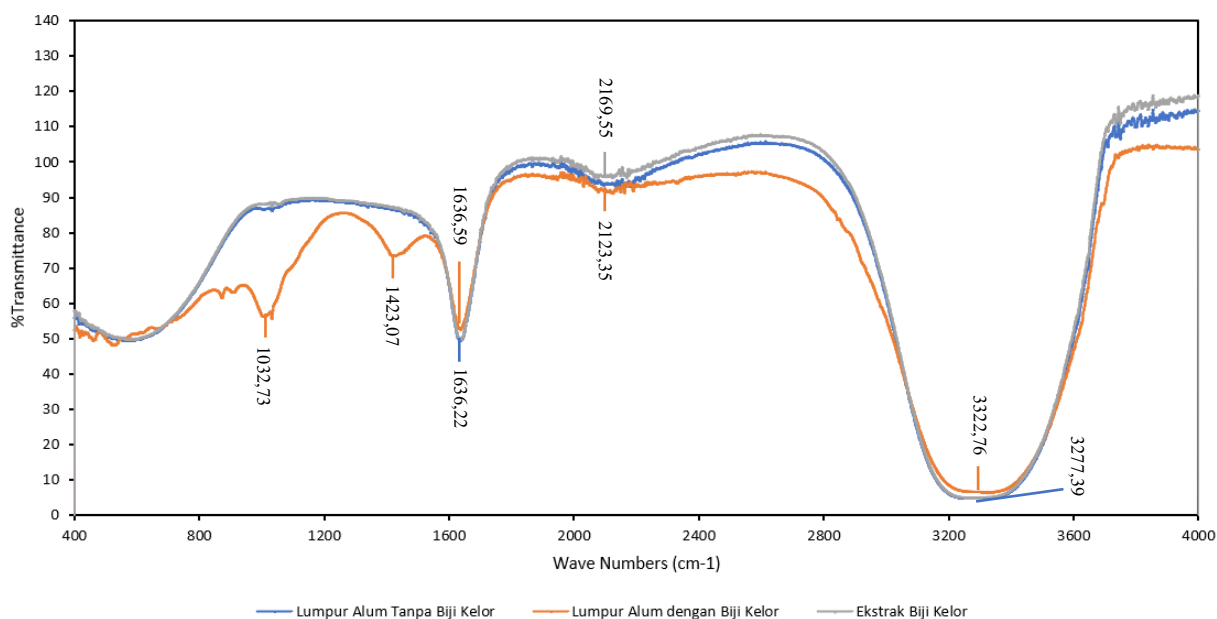
Pemilihan sampel uji FTIR didasarkan pada tiga kondisi utama, yaitu lumpur tanpa penambahan biji kelor, lumpur dengan penambahan biji kelor, dan ekstrak biji kelor untuk menggambarkan perbedaan morfologi permukaan dan komposisi unsur sebelum dan setelah penambahan biji kelor. Dosis tidak divariasikan secara langsung dalam uji ini, karena FTIR ditujukan untuk melihat keberadaan pengaruh material baru (biji kelor), bukan untuk menilai efek perubahan konsentrasinya. Hasil uji FTIR disajikan pada **Gambar 4.24** dan **Gambar 4.25**.

Tabel 4.4 Gugus Fungsi pada Sampel Lumpur

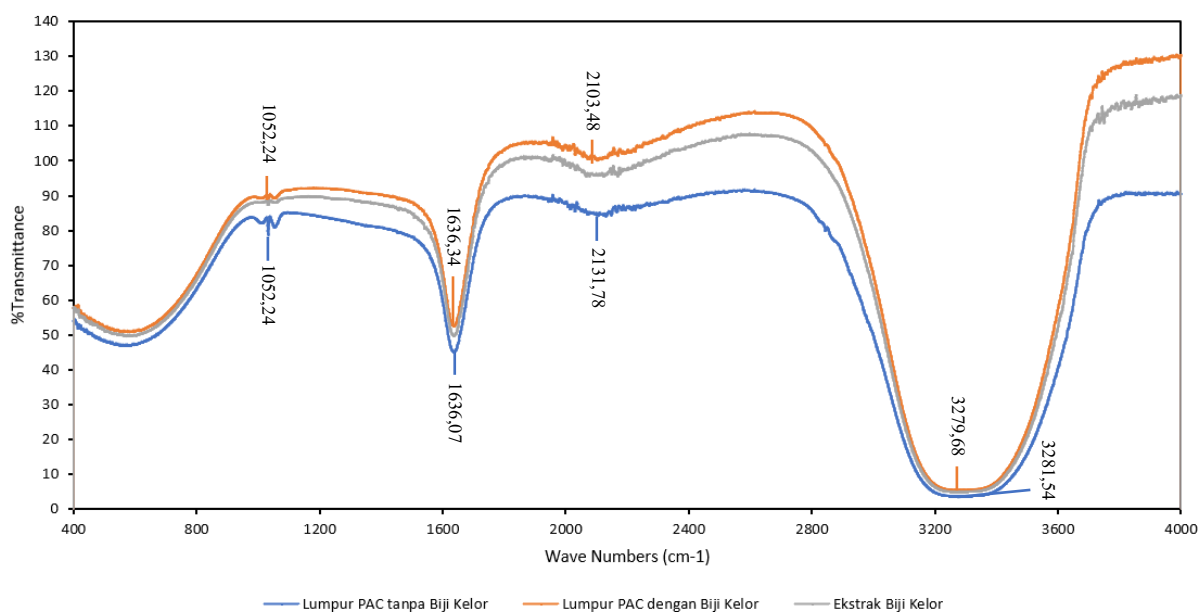
<i>Peak Position (cm⁻¹)</i>	<i>Literature Band Value (cm⁻¹)</i>	Referensi	Gugus Fungsi
Hasil Uji FTIR Sampel Lumpur Alum (Gambar 4.24)			
1032,73	900 - 1100	Nandiyanto <i>et al.</i> , 2023	<i>Silicate ion</i>
1423,07	1410 - 1490		<i>Carbonate ion</i>
1636,22 – 1636,59	1600 - 1650		<i>C = C (Aromatic compounds)</i>
2123,35 – 2169,59	near 2200		<i>C≡C</i>
3277,39 – 3322,76	3250 - 3650		1. C – H 2. – OH 3. N – H
Hasil Uji FTIR Sampel Lumpur PAC (Gambar 4.25)			
1052,04	900 - 1100	Nandiyanto <i>et al.</i> , 2023	<i>Silicate ion</i>
1636,07 – 1636,34	1600 - 1650		<i>C = C (Aromatic compounds)</i>
2103,48 – 2131,78	near 2200		<i>C≡C</i>
3279,68 – 3281,54	3250 - 3650		1. C – H 2. – OH

Peak Position (cm ⁻¹)	Literature Band Value (cm ⁻¹)	Referensi	Gugus Fungsi
			3. N – H

Berdasarkan **Gambar 4.24** dan **Gambar 4.25**, diperoleh temuan gugus fungsi berdasarkan panjang gelombang yang disajikan pada **Tabel 4.3**.



Gambar 4.24 Hasil Uji FTIR Sampel Lumpur Alum



Gambar 4.25 Hasil Uji FTIR Sampel Lumpur PAC

Berdasarkan **Gambar 4.24** dan **Gambar 4.25**, dilakukan identifikasi gugus fungsi pada panjang gelombang 400 – 4000 cm^{-1} . Area panjang gelombang 400 – 1500 cm^{-1} menunjukkan zona IV (*fingerprint*) yang berfungsi untuk mengidentifikasi ikatan senyawa dengan logam transisi (Maghfirah & Utomo, 2023). Pada **Gambar 4.24**, dalam zona IV tercatat panjang gelombang 1032,73 cm^{-1} dan **Gambar 4.25** sebesar 1052,04 cm^{-1} yang menunjukkan indikasi adanya *silicate ion* (Si_3^{2-}). Lumpur hasil pengolahan air mengandung silika dalam bentuk SiO_2 yang cukup signifikan. Studi yang dilakukan oleh Nuryanti *et al.*, (2017) menunjukkan hasil analisis XRF pada lumpur IPAM menunjukkan perbandingan kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 sebesar 49,11% : 29,45% dengan rasio Si : Al sekitar 1,5:1. Hal tersebut menunjukkan lumpur mengandung silika yang berasal dari air baku atau media yang terbawa dalam proses pengolahan. Dalam kondisi pH proses koagulasi-flokulasi (netral hingga sedikit basa), silika dapat terhidrolisis membentuk ion silikat (SiO_3^{2-}) yang kemudian berinteraksi dengan aluminium membentuk kompleks aluminosilikat dalam lumpur (Amaliasari, 2019).

Pada **Gambar 4.24**, hasil FTIR sampel lumpur alum dengan biji kelor pada zona IV (*fingerprint*) juga tercatat 1423,07 cm^{-1} menunjukkan adanya puncak baru yang muncul setelah penambahan ekstrak biji kelor. Hal tersebut disebabkan karena terbentuknya senyawa baru atau adanya interaksi kimia baru dalam sistem lumpur alum. Sebelumnya, pada grafik biru (tanpa biji kelor) relatif konstan pada daerah ini yang menandakan bahwa ion karbonat tidak terdeteksi atau kadarnya sangat rendah. Penambahan biji kelor dapat membawa senyawa organik yang mengalami dekomposisi atau reaksi dengan ion logam dalam lumpur menghasilkan karbonat. Reaksi antara protein, asam amino, atau polisakarida dari biji kelor dengan ion aluminium atau kalsium dalam lumpur dapat menghasilkan karbonat sebagai hasil samping. Interaksi antara protein kelor dan ion anorganik (termasuk karbonat) menghasilkan flok yang lebih stabil dan efisien dalam proses *dewatering* (Ghebremichael *et al.*, 2005).

Berbeda dengan **Gambar 4.25**, tidak muncul *finger peak* baru yang signifikan di daerah 1400 – 1500 cm^{-1} (daerah *carbonate ion*). Poly Aluminium Chloride (PAC) memiliki struktur yang lebih stabil dan reaktif dibandingkan alum ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). PAC membentuk kompleks hidroksilasi yang lebih kuat sehingga interaksi dengan senyawa organik dari biji kelor lebih terbatas pada permukaan flok atau tidak menghasilkan pembentukan senyawa baru seperti karbonat (Zouboulis & Traskas, 2005). Sementara itu, alum lebih mudah bereaksi dengan senyawa organik dan anorganik sehingga penambahan biji kelor pada lumpur alum menghasilkan reaksi baru, seperti pembentukan karbonat yang terdeteksi sebagai *finger peak* baru. Adsorpsi protein dari biji kelor pada permukaan lumpur PAC cenderung hanya memperkuat ikatan hidrogen atau meningkatkan densitas flok, tanpa membentuk senyawa baru yang terdeteksi di *fingerprint region* FTIR (Grunenwald *et al.*, 2014).

Area panjang gelombang 1500 – 2000 cm^{-1} menunjukkan zona III (*double bond*) yang mengindikasikan adanya pembentukan senyawa metabolit primer dan sekunder (Faramayuda *et al.*, 2021). Pada **Gambar 4.24**, dalam zona III tercatat panjang gelombang 1636,22 – 1636,59 cm^{-1} , sementara **Gambar 4.25** sebesar 1636,07 – 1636,34 cm^{-1} yang menunjukkan indikasi adanya gugus $\text{C} = \text{C}$ (*Aromatic compounds*). Kandungan protein (36,7%), lipid (34,6%), dan karbohidrat (5%) dari biji kelor memberi kontribusi terhadap kemunculan gugus tersebut (Ndabingengsere, 1995). Pada proses pengkondisian lumpur dengan biji kelor, senyawa aromatik dari biji kelor dapat berikatan dengan ion logam (Al^{3+} atau polimer PAC) atau teradsorpsi pada permukaan partikel lumpur membentuk struktur $\text{C} = \text{C}$ *aromatic*. Senyawa aromatik tersebut dapat berperan sebagai agen pengikat (*bridging agent*) dalam pembentukan flok yang lebih besar dan kuat sehingga membantu proses *dewatering*. Pada **Gambar 4.24**,

terlihat bahwa kurva lumpur alum dengan biji kelor pada panjang gelombang 1636 cm^{-1} berada di atas kurva lumpur alum tanpa biji kelor. Hal tersebut menunjukkan bahwa kurva yang semakin ke bawah, maka penyerapannya lebih tinggi pada bilangan tersebut (berlaku untuk seluruh panjang gelombang). Dengan demikian, penambahan biji kelor pada lumpur alum mampu menunjukkan penambahan atau interaksi senyawa aktif. Namun, pada **Gambar 4.25**, terlihat kurva lumpur PAC dengan biji kelor pada panjang gelombang 1636 cm^{-1} berada di bawah kurva lumpur PAC tanpa biji kelor. Hal itu disebabkan karena nilai SVI lumpur alum (**Gambar 4.6**) lebih tinggi dari SVI lumpur PAC (**Gambar 4.7**) yang menunjukkan struktur lumpur alum lebih terbuka dan kapasitas adsorpsi lebih baik (Zouboulis & Traskas, 2005).

Area panjang gelombang $2000 - 2500\text{ cm}^{-1}$ merupakan zona II (*triple bond*). Pada **Gambar 4.24**, zona II tercatat panjang gelombang $2123,35 - 2169,59\text{ cm}^{-1}$, sementara **Gambar 4.25** sebesar $2103,48 - 2131,78\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan indikasi adanya gugus $\text{C} \equiv \text{C}$ (alkuna). Keberadaan gugus tersebut dalam lumpur alum maupun PAC berasal dari bahan organik alami air baku, seperti humat, fulvat, dan sisa biomassa mikroba atau tumbuhan. Proses degradasi dan oksidasi selama pengolahan air dapat membentuk senyawa yang mengandung ikatan rangkap tiga (Tian *et al.*, 2014). Kemunculan gugus ini dalam ekstrak biji kelor kemungkinan berasal dari senyawa sekunder alami seperti alkin atau nitril yang terbentuk secara alami. Selain itu, interaksi dengan lumpur alum atau PAC dapat memicu transformasi kimia, seperti fiksasi senyawa organik yang mengandung ikatan rangkap tiga atau nitril dari lingkungan sampel. Penelitian sebelumnya oleh Santhi & Sengottuvel, (2017) juga menyebutkan bahwa pada ekstrak biji *Moringa oleifera*, terjadi serapan serupa yang menunjukkan keberadaan gugus–gugus alkin, seperti pada studi spektroskopi FTIR yang menunjukkan panjang gelombang $2226 - 2224\text{ cm}^{-1}$ sebagai tanda keberadaan $\text{C} \equiv \text{C}$.

Area panjang gelombang $2500 - 4000\text{ cm}^{-1}$ merupakan zona I (*single bond*). Berdasarkan **Gambar 4.24**, zona I tercatat panjang gelombang $3277,39 - 3322,76\text{ cm}^{-1}$, sementara **Gambar 4.25** sebesar $3279,68 - 3281,54\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan indikasi adanya gugus $\text{C} - \text{H}$, $-\text{OH}$, dan $\text{N} - \text{H}$. Gugus $\text{C} - \text{H}$ menunjukkan keberadaan senyawa alkil atau metil yang umum ditemukan dalam struktur lipid atau senyawa organik alifatik dari ekstrak biji kelor. Gugus tersebut berperan sebagai indikasi struktur hidrokarbon nonpolar yang berkontribusi dalam mekanisme pengikatan hidrofobik pada proses pengkondisian lumpur. Gugus $-\text{OH}$ berasal dari senyawa yang terikat dalam bahan organik alami, seperti ekstrak biji kelor atau senyawa humat dalam lumpur. Gugus ini berperan dalam membentuk ikatan hidrogen yang membantu dalam proses adsorpsi serta interaksi elektrostatis antara muatan partikel lumpur dan koagulan alami. Sementara gugus $\text{N} - \text{H}$ berasal dari senyawa protein atau amina dalam biji kelor berperan dalam ikatan elektrostatis dengan partikel bermuatan negatif serta dapat membentuk jembatan ikatan hidrogen antar molekul (Nandiyanto *et al.*, 2023). Penelitian sebelumnya oleh Mansour *et al.*, (2024) menyebutkan bahwa pada biji *Moringa oleifera* terdapat serapan serupa yang menunjukkan keberadaan gugus–gugus hidroksil, seperti pada studi spektroskopi FTIR yang menunjukkan panjang gelombang 3298 cm^{-1} dan $2916 - 2921\text{ cm}^{-1}$ sebagai tanda keberadaan $\text{C} - \text{H}$, $-\text{OH}$, $\text{N} - \text{H}$. Kandungan protein (36,7%) dan lipid (34,6%) dari biji kelor memberi kontribusi terhadap kemunculan gugus tersebut (Ndabingengsere, 1995).

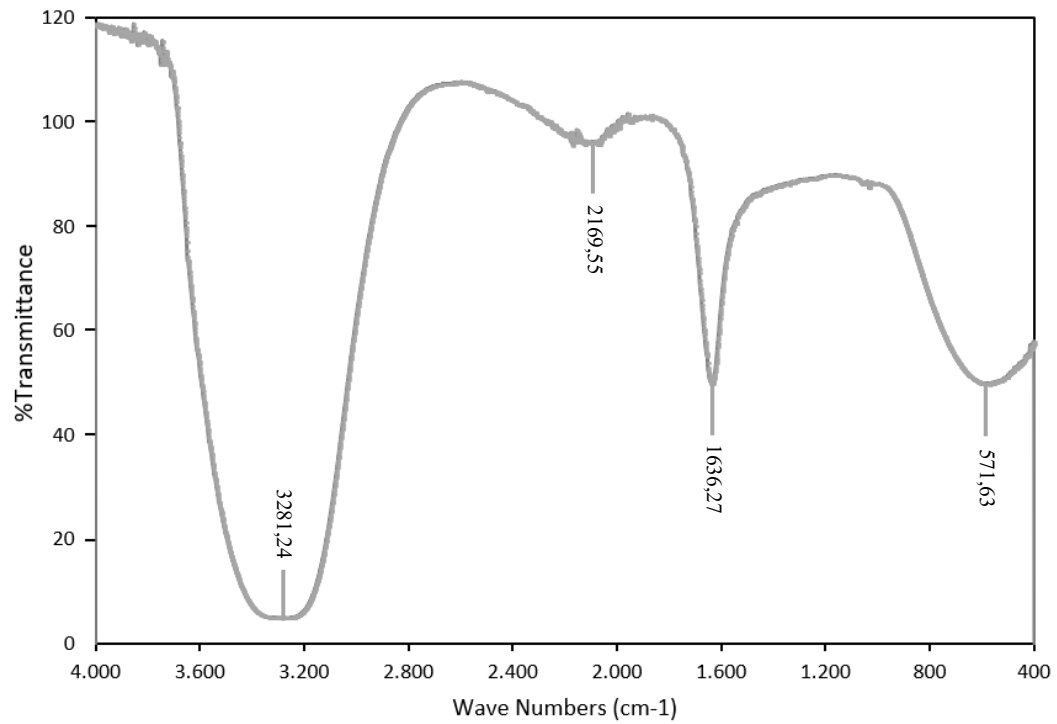
Pada **Gambar 4.24**, nilai %*transmittance* cenderung menurun setelah penambahan biji kelor yang berarti penyerapan radiasi inframerah meningkat. Penurunan % *transmittance* ini mengindikasikan terbentuknya ikatan atau interaksi kimia antara gugus fungsi protein dan polisakarida dari biji kelor dengan lumpur alum sehingga gugus aktif, seperti $\text{C} \equiv \text{C}$ menjadi lebih banyak dan lebih aktif menyerap radiasi IR. Fenomena ini sesuai dengan mekanisme

pengkondisian yang dijelaskan oleh penelitian sebelumnya, dimana protein aktif dari biji kelor berperan sebagai agen koagulan yang mengikat partikel tersuspensi melalui interaksi elektrostatis dan pembentukan jembatan antar partikel (Okuda *et al.*, 2001). Sebaliknya, **Gambar 4.25** memiliki nilai %*transmittance* cenderung meningkat setelah penambahan biji kelor yang menunjukkan penurunan penyerapan radiasi IR oleh gugus fungsi. Hal ini dapat diartikan bahwa protein dan senyawa aktif dari biji kelor lebih banyak menutupi atau melapisi permukaan lumpur PAC yang memiliki luas permukaan lebih besar dan berpori sehingga gugus aktif pada permukaan PAC menjadi kurang terdifusi dan tidak efektif menyerap radiasi IR. Mekanisme ini mengarah pada adsorpsi fisik tanpa ikatan kimia kuat dan pembentukan lapisan pasif pada lumpur PAC yang mengurangi jumlah gugus aktif yang terdeteksi oleh FTIR. Studi terkait juga menunjukkan bahwa sifat fisik dan kimia permukaan adsorben seperti PAC sangat mempengaruhi interaksi dengan protein biji kelor sehingga pola penyerapan IR dapat berbeda dibandingkan dengan lumpur alum (Addich *et al.*, 2024).

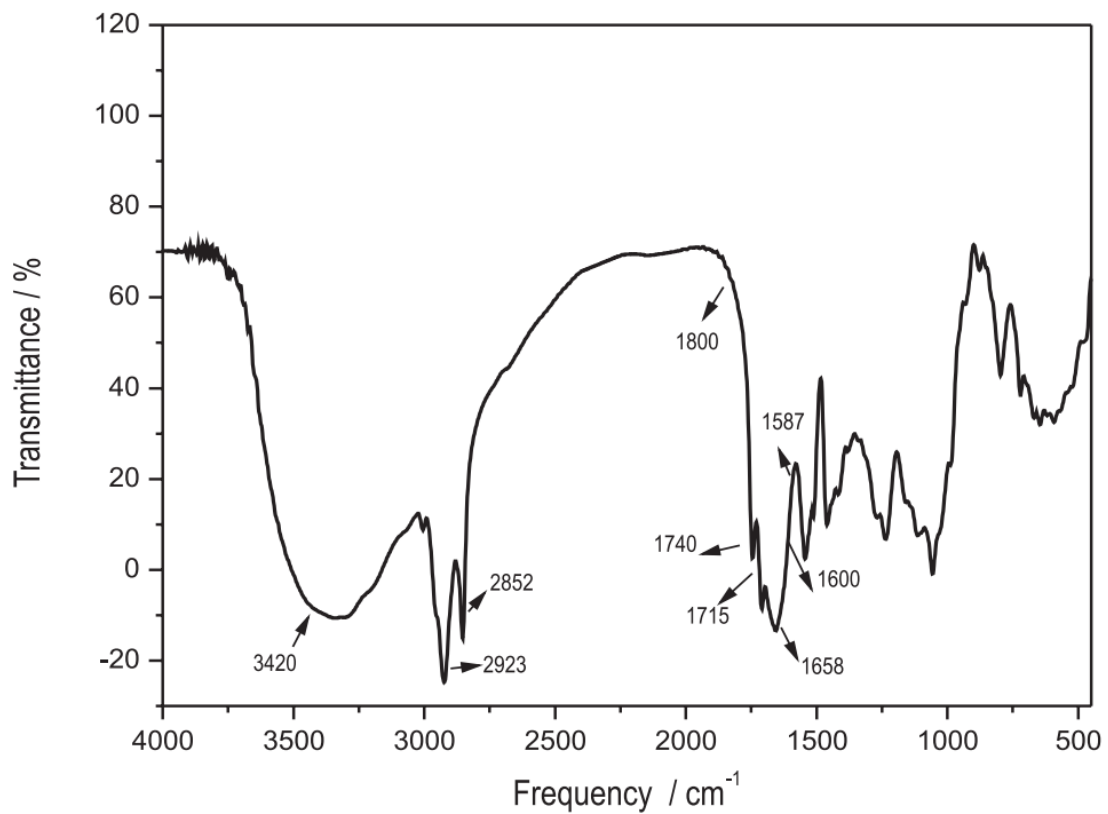
Perbandingan hasil FTIR ekstrak biji kelor dengan hasil penelitian (**Gambar 4.26**) oleh Araujo *et al.*, (2010) menunjukkan bahwa spektrum FTIR dalam penelitian ini sebagian besar konsisten, khususnya pada dua puncak. Berdasarkan **Gambar 4.26** (a) dan **Gambar 4.26** (b), panjang gelombang yang muncul berturut-turut sebesar $3281,24\text{ cm}^{-1}$ dan 3420 cm^{-1} sama-sama mengindikasikan keberadaan gugus hidroksil (-OH), amina (N-H), dan C-H yang berasal dari kandungan protein, senyawa fenolik, dan karbohidrat dalam biji kelor. Kehadiran gugus tersebut merupakan karakteristik khas bahan alami yang kaya akan senyawa bioaktif polar, serta mencerminkan potensi interaksi ikatan hidrogen dengan partikel lumpur yang menjadi dasar mekanisme adsorpsi dan *bridging flocculation*. Panjang gelombang selanjutnya berturut-turut pada $1636,27\text{ cm}^{-1}$ (**Gambar 4.26** (a)) dan 1658 cm^{-1} (**Gambar 4.26** (a)) yang menunjukkan adanya gugus C=C (alkena) dalam senyawa tak jenuh dari ekstrak kelor. Hal itu merujuk pada kemungkinan keberadaan senyawa fenolik terkonjugasi atau komponen alkaloid yang mengandung sistem ikatan rangkap dua. Dengan demikian, protein dan senyawa bioaktif dalam biji kelor tidak hanya berperan sebagai agen pengikat (*bridging*), namun juga memiliki potensi antioksidan atau aktivitas kimia lainnya melalui gugus alkena tersebut.

Perbedaan kecil dalam posisi puncak dan ketajaman peak dapat diinterpretasikan sebagai hasil dari variasi dalam komposisi biomolekul, kondisi ekstraksi, atau kadar air dalam sampel. Selain itu, adanya *peak* tambahan pada penelitian oleh Araujo *et al.*, (2010) seperti 1587 cm^{-1} yang dimungkinkan adanya kehadiran C-N dan deformasi N-H pada spektrum penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan struktur sekunder protein atau tingkat degradasi yang dapat memengaruhi profil vibrasi molekul. Dengan demikian, meskipun terdapat perbedaan interpretasi spektrum terhadap beberapa panjang gelombang, data ini (**Gambar 4.26** (a) dan **Gambar 4.26** (b)) tetap menunjukkan bahwa ekstrak biji kelor dalam penelitian ini mengandung senyawa bioaktif utama yang konsisten, dengan kontribusi utama dari gugus hidroksil, alifatik, dan alkena yang berpotensi aktif dalam mekanisme pengkondisian lumpur.

Spektrum FTIR menunjukkan bahwa kandungan dominan protein dan lipid dalam biji kelor memberikan kontribusi signifikan terhadap kemunculan gugus amina (N-H), hidroksil (-OH), alifatik (C-H), dan alkena (C=C), yang masing-masing memiliki peran penting dalam mekanisme interaksi dengan lumpur, seperti adsorpsi, *bridging flocculation*, dan netralisasi muatan permukaan partikel.



(a)



(b)

Gambar 4.26 Hasil Uji FTIR *Moringa oleifera* (a) Hasil Penelitian (b) Penelitian Terdahulu (Sumber: Araujo *et al.*, 2010)

4.2.9 Zeta Potensial

Analisis zeta potensial dilakukan pada lumpur mengandung alum dan PAC tanpa perlakuan biji kelor serta tiga dosis terpilih pada setiap perlakuan bentuk biji kelor (ekstrak dan serbuk). Nilai rata-rata hasil uji zeta potensial pada lumpur mengandung alum tanpa penambahan biji kelor sebesar $-23,36 \pm 0,51$ mV dan lumpur mengandung PAC tanpa penambahan biji kelor sebesar $-15,57 \pm 1,46$ mV. Nilai zeta potensial menggambarkan besarnya gaya tolak-menolak antar partikel bermuatan dalam suspensi dimana semakin mendekati nol, semakin mudah partikel-partikel tersebut mengalami penggumpalan (agregasi). Kondisi tersebut sejalan dengan penelitian oleh Valverde *et al.*, (2018) yang melaporkan bahwa air baku tanpa penambahan koagulan alami memiliki nilai zeta potensial sekitar $-21,00 \pm 0,38$ mV menunjukkan tingginya kestabilan koloid dalam air dan kebutuhan akan bahan penetral muatan untuk mendorong pembentukan flok.

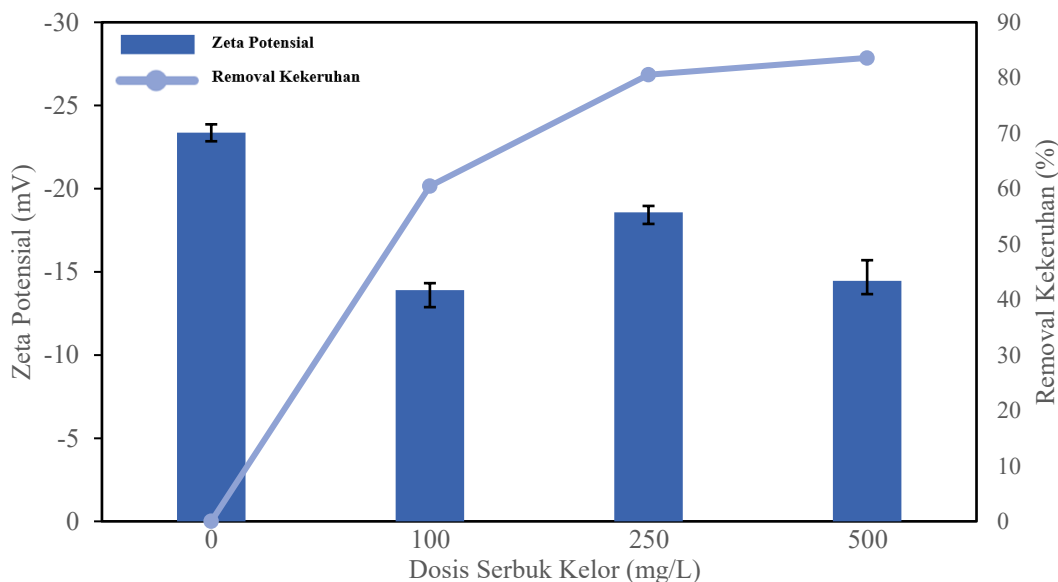
Penambahan bahan pengkondisi alami seperti biji kelor (*Moringa oleifera*) yang mengandung protein bermuatan positif, berpotensi dalam menurunkan nilai absolut zeta potensial dan meningkatkan efisiensi pengkondisian lumpur melalui mekanisme netralisasi muatan atau pembentukan jembatan antar partikel. Hasil uji zeta potensial dari sampel lumpur alum disajikan pada **Gambar 4.27** dan **Gambar 4.28**. Sementara hasil uji zeta potensial dari sampel lumpur PAC disajikan pada **Gambar 4.29** dan **Gambar 4.30**.

Berdasarkan **Gambar 4.27** hingga **Gambar 4.30**, terlihat bahwa baik biji kelor berbentuk serbuk maupun ekstrak biji kelor mampu memodifikasi zeta potensial lumpur alum dan PAC menuju arah yang lebih netral. Namun, demikian efektifitas keduanya berbeda. Dalam mencapai nilai zeta potensial sekitar -13 mV, serbuk kelor pada lumpur alum hanya memerlukan dosis sebanyak 100 mg/L, sedangkan ekstrak kelor memerlukan dosis yang jauh lebih tinggi, yaitu hingga 500 mg/L (**Gambar 4.28**). Perbedaan ini menunjukkan bahwa serbuk kelor memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan ekstrak dalam menetralkan muatan partikel pada lumpur alum. Hal yang serupa juga diamati pada lumpur PAC (**Gambar 4.29** dan **Gambar 4.30**), dimana serbuk kelor menunjukkan pengaruh signifikan pada dosis yang lebih rendah dibandingkan ekstrak.

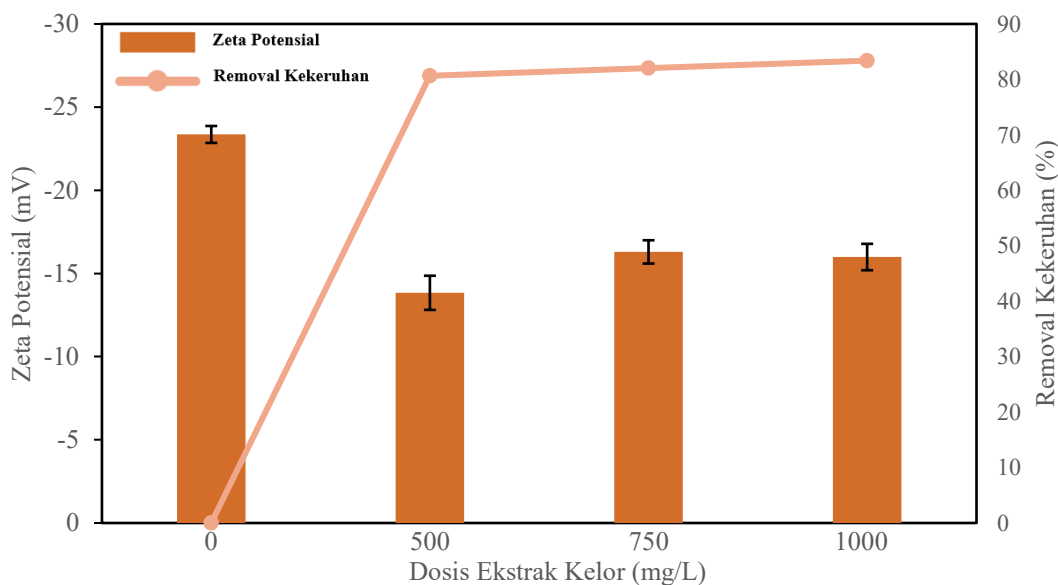
Serbuk biji kelor (*Moringa oleifera*) terbukti lebih efektif dalam menurunkan nilai zeta potensial lumpur yang mengandung koagulan aluminium sulfat (alum) maupun *Poly Aluminium Chloride* (PAC) dibandingkan dengan ekstrak biji kelor. Efektivitas ini berkaitan erat dengan dua mekanisme utama, yaitu mekanisme polimer dan mekanisme adsorpsi. Pada mekanisme polimer, serbuk biji kelor mengandung protein kationik aktif yang bekerja melalui mekanisme netralisasi muatan dan pembentukan jembatan antar partikel. Protein yang bersifat kationik mampu menetralkan muatan negatif pada permukaan partikel lumpur. Dalam bentuk serbuk, protein dan senyawa aktif lainnya tidak mengalami degradasi atau kehilangan struktur fungsional akibat proses ekstraksi sehingga efektivitas pengikatan muatan dan pembentukan flok lebih tinggi dibandingkan ekstraknya.

Selain itu, mekanisme adsorpsi pada serbuk biji kelor juga berperan signifikan. Serbuk mengandung komponen padat seperti serat, polisakarida, dan lipid yang tidak hanya bertindak sebagai pembawa protein aktif, tetapi juga memiliki kemampuan adsorptif terhadap partikel tersuspensi dan ion logam dalam lumpur. Kandungan padatan ini memberikan luas permukaan yang lebih besar dibanding ekstrak sehingga memungkinkan interaksi lebih intensif antara serbuk dan partikel lumpur. Menurut penelitian oleh Batista *et al.* (2023) melaporkan bahwa penambahan serbuk biji kelor sebelum proses pengkondisian lumpur secara signifikan menurunkan nilai zeta potensial, kekeruhan supernatan, dan meningkatkan laju pemisahan flok. Penelitian lain oleh Nouhi *et al.* (2019) menunjukkan bahwa protein dari biji kelor dapat membentuk lapisan penutup pada permukaan partikel bermuatan negatif dengan nilai zeta potensial positif hingga +20 mV yang dapat memperkuat kemampuan netralisasi muatan.

Sementara itu, ekstrak biji kelor hanya membawa sebagian kecil fraksi protein terlarut dan kehilangan banyak komponen penyokong lainnya sehingga kemampuannya dalam menurunkan zeta potensial relatif lebih rendah.



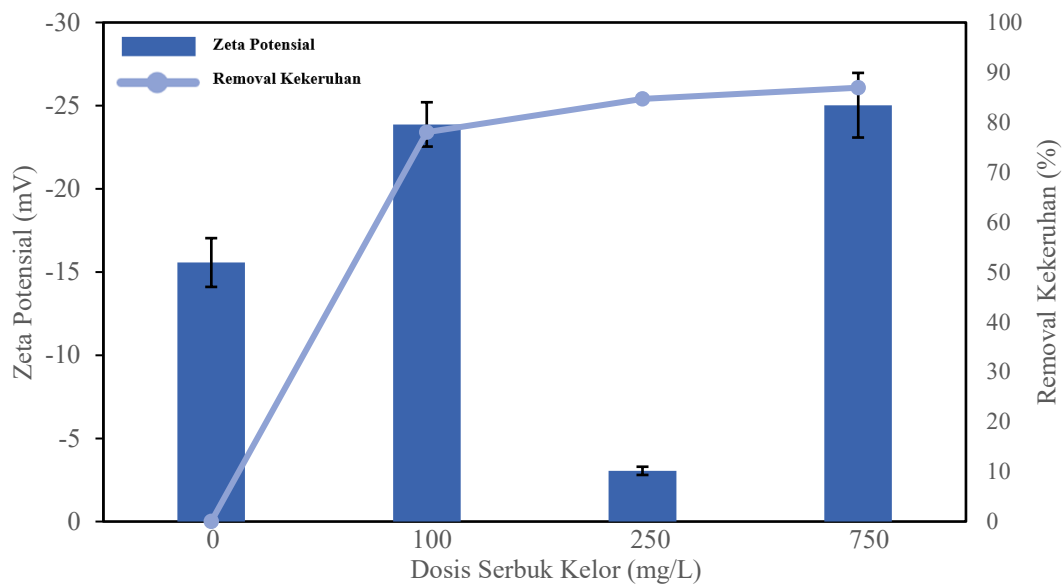
Gambar 4.27 Hasil Uji Zeta Potensial pada Lumpur Alum (Variasi Serbuk)



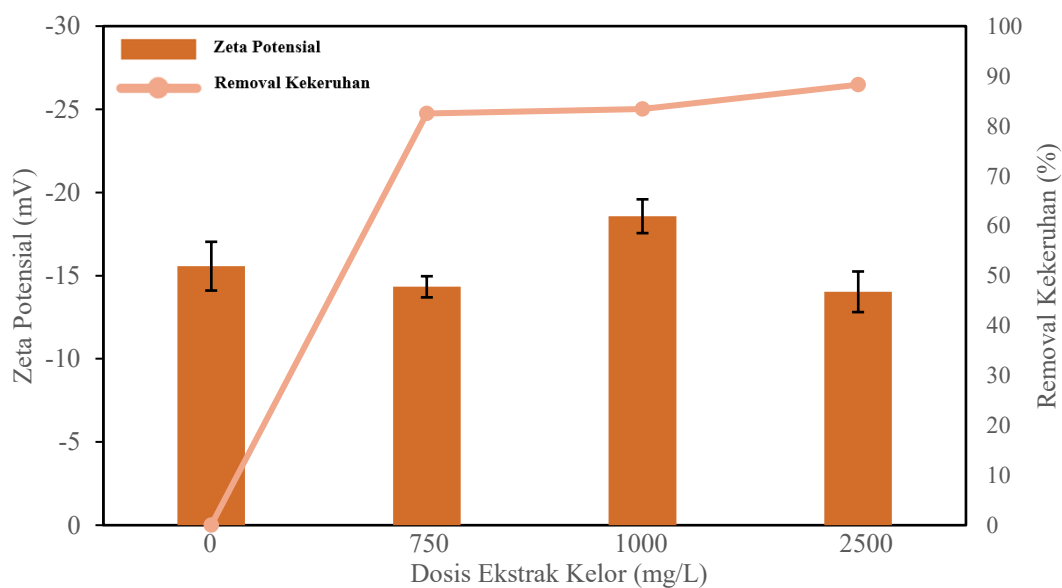
Gambar 4.28 Hasil Uji Zeta Potensial pada Lumpur Alum (Variasi Ekstrak)

Dengan demikian, keunggulan serbuk biji kelor dalam menurunkan zeta potensial pada lumpur alum maupun PAC disebabkan oleh sinergi antara mekanisme pengikatan muatan oleh protein kationik dan kapasitas adsorpsi yang tinggi dari komponen padat dalam serbuk. Kombinasi ini tidak dimiliki oleh ekstrak sehingga menjadikan serbuk lebih unggul sebagai bahan pengkondisi alami pada proses pengolahan lumpur. Temuan ini sejalan dengan berbagai studi terdahulu yang menekankan peran penting bentuk fisik dan kandungan aktif serbuk biji kelor dalam proses netralisasi muatan dan pembentukan flok yang stabil. Menurut Ademiluyi

(1988), disebutkan bahwa serbuk biji kelor mampu meningkatkan konsentrasi padatan *cake* dan menurunkan SRF pada lumpur.



Gambar 4.29 Hasil Uji Zeta Potensial pada Lumpur PAC (Variasi Serbuk)



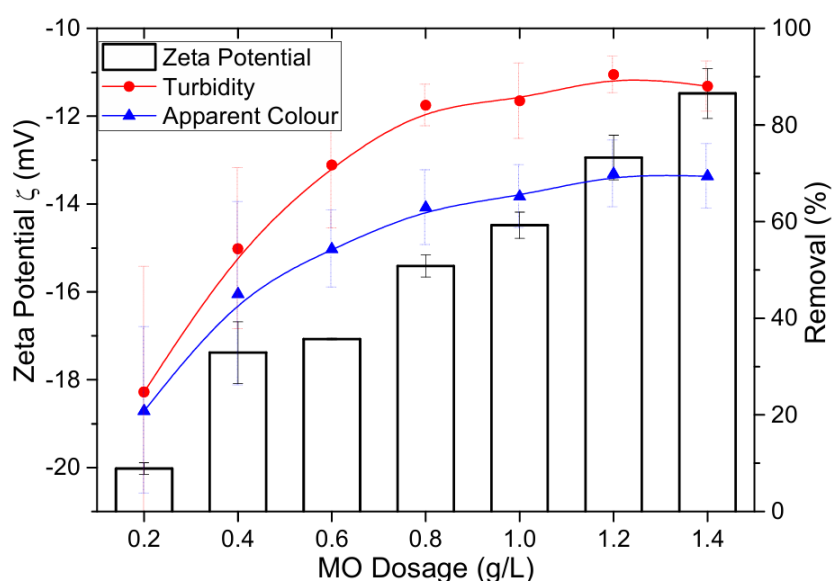
Gambar 4.30 Hasil Uji Zeta Potensial pada Lumpur PAC (Variasi Ekstrak)

Dengan demikian, keunggulan serbuk biji kelor dalam menurunkan zeta potensial pada lumpur alum maupun PAC disebabkan oleh sinergi antara mekanisme pengikatan muatan oleh protein kationik dan kapasitas adsorpsi yang tinggi dari komponen padat dalam serbuk. Kombinasi ini tidak dimiliki oleh ekstrak sehingga menjadikan serbuk lebih unggul sebagai bahan pengkondisi alami pada proses pengolahan lumpur. Temuan ini sejalan dengan berbagai studi terdahulu yang menekankan peran penting bentuk fisik dan kandungan aktif serbuk biji kelor dalam proses netralisasi muatan dan pembentukan flok yang stabil. Menurut Ademiluyi

(1988), disebutkan bahwa serbuk biji kelor mampu meningkatkan konsentrasi padatan *cake* dan menurunkan SRF pada lumpur.

Penggunaan protein dari biji kelor ditunjukkan mampu memodifikasi zeta potensial partikel-partikel dalam air. Protein larut air dari biji kelor dapat berinteraksi dengan muatan negatif pada partikel lumpur sehingga menurunkan nilai absolut zeta potensial menuju nol. Mekanisme ini mendukung pemanfaatan biji kelor sebagai agen pengkondisi lumpur alami yang ramah lingkungan dalam pengolahan air (Kwaambwa & Rennie, 2011). Namun berdasarkan **Gambar 4.27**, pada dosis kelor 100 mg/L terjadi proses partikel protein kelor (bermuatan positif) menetralkan partikel lumpur bermuatan negatif secara efektif sehingga meningkatkan zeta potensial (lebih mendekati nol). Pada dosis ini biji kelor berperan dalam menetralkan seluruh partikel lumpur serta menyeimbangkan muatan sistem secara menyeluruh. Sementara pada dosis 250 mg/L, terjadi penggumpalan cepat yang tidak stabil membentuk flok yang rapuh dan menyebabkan resuspensi partikel kecil. Lokasi *bridging* yang padat akan menyebabkan pembentukan flok tidak stabil kembali (Yin, 2010). Hal tersebut dapat meningkatkan kembali muatan negatif sehingga zeta potensial kembali lebih negatif. Pada dosis 500 mg/L, biji kelor sudah cukup untuk menetralkan muatan kembali dan meningkatkan zeta potensial. Pada dosis ini dapat menutupi permukaan partikel secara merata dan mengembalikan kestabilan sistem (zeta potensial meningkat kembali). Hal yang serupa juga terjadi pada uji yang disajikan pada **Gambar 4.28** dan **Gambar 4.30**.

Berdasarkan **Gambar 4.29**, zeta potensial lumpur PAC meningkat pada dosis 100 mg/L menunjukkan bahwa adsorpsi protein dari serbuk kelor belum mampu menetralkan muatan, bahkan memperkuat muatan negatif. Pada dosis 250 mg/L, nilai zeta potensial justru menurun drastis (mendekati nol) yang mengindikasikan terjadinya netralisasi muatan yang optimal. Namun, pada dosis 750 mg/L, zeta potensial kembali menjadi lebih negatif yang menunjukkan fenomena restabilisasi akibat kelebihan muatan positif biji kelor. Fenomena ini disebut restabilisasi muatan sebagaimana dijelaskan Yin (2010), bahwa dosis koagulan yang berlebih menyebabkan adsorpsi tidak netral lagi, melainkan partikel kembali stabil karena muatan sejenis melapisi permukaannya secara berlebih (*surface saturation*). Hal tersebut juga sejalan dengan Okuda *et al.*, (2001) bahwa penyerapan biopolimer yang berlebihan menyebabkan restabilisasi partikel karena akumulasi muatan permukaan daripada netralisasi.



Gambar 4.31 Hasil Uji Zeta Potensial dan Kekeruhan pada Penelitian Terdahulu (Sumber: Batista *et al.*, 2023)

Pada tahap pencampuran biji kelor ke dalam lumpur dapat disimpulkan terjadi pelibatan proses adsorpsi dengan penetralan muatan (*charge neutralization*), serta adsorpsi yang disertai pembentukan jembatan antar partikel (*inter-particle bridging*). Penurunan zeta potensial yang seharusnya seiring dengan penurunan kekeruhan filtrat menunjukkan bahwa mekanisme penetralan muatan terjadi secara dominan pada dosis tertentu. Penurunan kekeruhan terlihat seiring dengan bertambahnya dosis biji kelor yang sesuai. Hal tersebut sejalan dengan hasil penelitian terdahulu oleh Batista *et al.*, (2024) pada **Gambar 4.31** bahwa mekanisme koagulasi adsorpsi dan netralisasi muatan terjadi karena potensi zeta potensial yang terdapat dalam supernatan dinetralkan hingga gaya tarik lebih besar daripada gaya tolak. Oleh karena itu, terbentuklah flok yang lebih besar dan menjernihkan supernatan. Mekanisme pengkondisian lumpur tersebut merupakan netralisasi muatan yang disebabkan oleh adsorpsi protein kationik biji kelor (Yamaguchi *et al.*, 2021).

Dalam penelitian ini, serbuk biji kelor terbukti lebih efektif dibandingkan ekstraknya dalam menurunkan nilai absolut zeta potensial pada lumpur alum maupun PAC. Pada lumpur alum, penambahan 100 mg/L serbuk biji kelor mampu menurunkan nilai zeta potensial dari $-23,36 \pm 0,51$ mV menjadi sekitar $-13,90 \pm 0,41$ mV. Sementara itu, pada lumpur PAC, dosis 250 mg/L serbuk kelor menghasilkan penurunan yang paling signifikan dari $-15,57 \pm 1,47$ mV menjadi mendekati $-3,05 \pm 0,25$ mV. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa kedua dosis tersebut merupakan titik optimum dalam menetralkan muatan partikel yang memperkuat proses pengkondisian dan meningkatkan stabilitas flok.

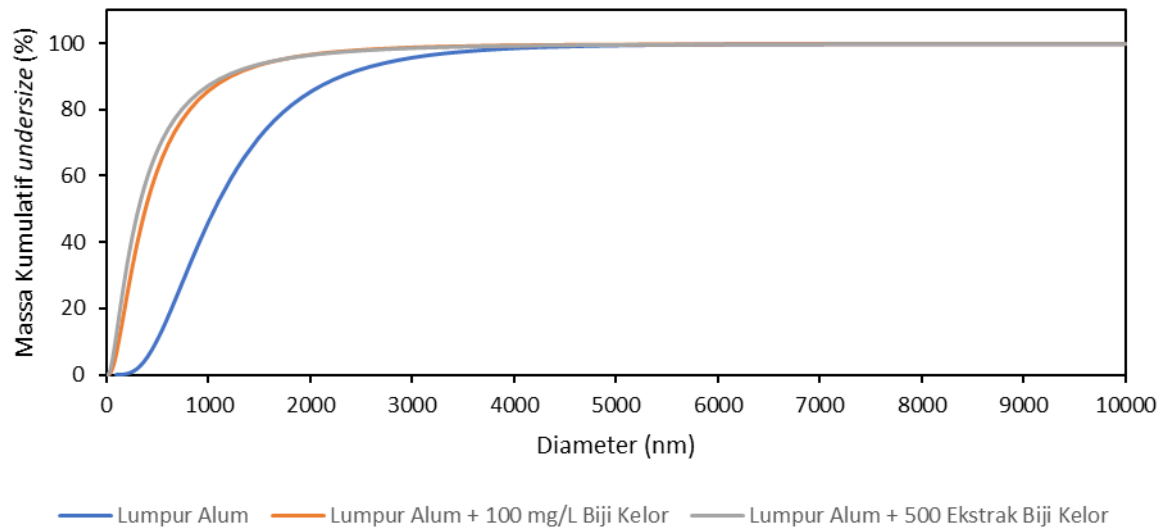
Kondisi ini juga tercermin dalam parameter kinerja *dewatering* lainnya. Pada lumpur alum, dosis 100 mg/L menghasilkan nilai *Specific Resistance to Filtration* (SRF) terendah sebesar 0,019 m/kg, menandakan resistansi terhadap aliran filtrat sangat rendah dan *dewatering* berlangsung dengan efisiensi tinggi. Penurunan zeta potensial yang sejalan dengan nilai SRF rendah menunjukkan bahwa netralisasi muatan berhasil menciptakan flok yang besar dan padat. Selain itu, kekeruhan supernatan turun signifikan dari 151 NTU menjadi 59,70 NTU, TSS menurun menjadi 120 mg/L, dan nilai SVI juga membaik menjadi 671,43 mL/g, memperkuat bukti bahwa flok yang terbentuk lebih stabil dan mudah mengendap. Nilai pH tetap stabil pada 6,96 dan suhu sekitar 25°C yang menunjukkan bahwa penambahan kelor tidak mengganggu kesetimbangan kimia dalam sistem lumpur.

Sementara itu, pada lumpur PAC, dosis 250 mg/L serbuk kelor memberikan hasil zeta potensial sebesar $-3,05 \pm 0,25$ mV yang ideal untuk pembentukan flok. Dosis ini juga memberikan SRF terendah yaitu 0,029 m/kg, yang memperlihatkan proses filtrasi berlangsung dengan sangat baik. Kekeruhan menurun drastis menjadi 12,68 NTU, TSS mencapai 130 mg/L, dan TS stabil pada 2860 mg/L. Nilai pH tidak mengalami perubahan signifikan, berada pada kisaran netral yaitu 7,05 dan suhu sistem juga relatif konstan. Pola ini menunjukkan bahwa penurunan zeta potensial berkontribusi langsung terhadap performa pengkondisian yang optimal, baik dari segi efisiensi penyisihan padatan tersuspensi, kejernihan filtrat, maupun kestabilan flok. Oleh karena itu, kombinasi antara kemampuan menurunkan zeta potensial dan pengaruh positif terhadap parameter lain menjadikan dosis 100 mg/L untuk lumpur alum dan 250 mg/L untuk lumpur PAC sebagai pilihan paling efektif dalam proses pengkondisian lumpur menggunakan serbuk biji kelor.

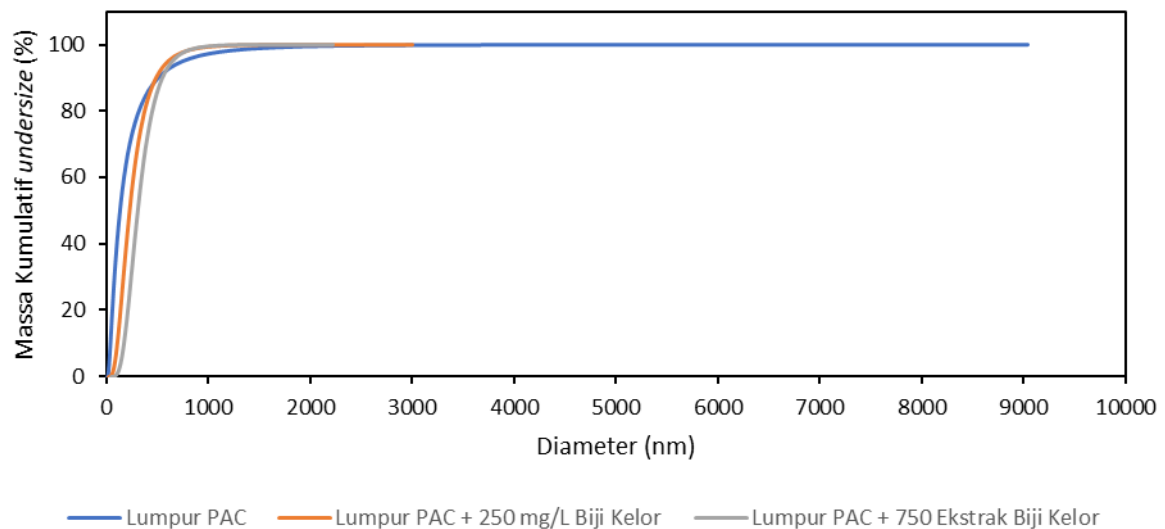
4.2.10 Particle Size Distribution (PSD)

Pengujian PSD dilakukan pada sampel lumpur alum tanpa biji kelor (A0(a)), lumpur PAC tanpa biji kelor (A0(p)), lumpur alum dengan 100 mg/L serbuk biji kelor (A1(a)), lumpur PAC dengan 250 mg/L serbuk biji kelor (A2(p)), lumpur alum dengan 500 mg/L ekstrak biji kelor (B3(a)), dan lumpur PAC dengan 750 mg/L biji kelor (B4(p)) untuk mengetahui distribusi partikel pada lumpur yang telah dikondisikan menggunakan biji kelor berbentuk serbuk

maupun ekstrak sebagai analisis akhir. Hasil uji PSD lumpur alum disajikan pada **Gambar 4.32** dan lumpur PAC pada **Gambar 4.33**.



Gambar 4.32 Hasil Uji PSD Sampel Lumpur Alum



Gambar 4.33 Hasil Uji PSD Sampel Lumpur PAC

Berdasarkan **Gambar 4.32**, penambahan serbuk biji kelor (*Moringa oleifera*) pada lumpur alum memberikan perubahan signifikan terhadap distribusi ukuran partikel lumpur. Distribusi ukuran partikel lumpur yang dihasilkan dari proses pengkondisian tanpa penambahan biji kelor memiliki kurva yang lebih landai dibandingkan dengan lumpur yang ditambahkan biji kelor. Perlakuan lumpur alum tanpa biji kelor menunjukkan massa kumulatif *undersize* 80% baru tercapai pada ukuran partikel sekitar 2000-4000 nm. Ini menunjukkan bahwa sebagian besar partikel masih berukuran besar dan belum mengalami aglomerasi yang optimal. Namun, setelah ditambahkan 100 mg/L serbuk biji kelor, kurva bergeser ke kiri dan menjadi lebih curam. Hal ini mengindikasikan bahwa partikel mengalami proses pengkondisian yang menghasilkan

ukuran partikel yang homogen dan berukuran lebih kecil pada lumpur alum. Distribusi ukuran partikel yang lebih curam (kurva yang cepat mencapai 100%) mencerminkan sistem yang lebih seragam dan terbaik (Panjaitan *et al.*, 2024).

Penambahan serbuk biji kelor pada lumpur alum mampu menurunkan ukuran rata-rata partikel secara signifikan dari 1116,41 nm (tanpa biji kelor) menjadi 410,24 nm. Penurunan ini juga disertai penurunan standar deviasi ukuran partikel dari 15,62 nm menjadi 5,77 nm yang menunjukkan distribusi partikel lebih seragam. Semakin kecil nilai standar deviasi, maka tingkat kepercayaan distribusi partikel koloid juga semakin baik (Mujiyanti *et al.*, 2019). Dapat dikatakan bahwa lumpur alum dengan penambahan biji kelor memiliki distribusi ukuran lebih kecil dan ketelitian yang tinggi dibandingkan sampel lumpur alum tanpa biji kelor.

Pada **Gambar 4.33**, lumpur PAC yang ditambahkan 250 mg/L serbuk biji kelor semakin bergeser ke kanan yang berarti memiliki diameter lebih besar, khususnya pada kisaran 600-1500 nm. Hal ini menunjukkan bahwa partikel-partikel kecil yang mengalami aglomerasi menjadi flok yang lebih besar dan merata sehingga menggeser ukuran dominan partikel ke arah yang lebih besar. Efek serupa juga diamati pada penambahan 750 mg/L ekstrak biji kelor dengan pergeseran sedikit ke kanan. Pergeseran tersebut menyebabkan kurva menjadi lebih curam yang mengindikasikan bahwa partikel mengalami proses pengkondisian yang menghasilkan ukuran partikel yang homogen dan berukuran lebih besar pada lumpur PAC. Hal ini juga dibuktikan dengan nilai polidispersitas yang semakin menurun. Nilai polidispersitas pada lumpur PAC tanpa biji kelor, dengan 250 mg/L serbuk biji kelor, dan 750 mg/L ekstrak biji kelor berturut-turut adalah 2,208; 0,4291; dan 0,2242. Nilai tersebut menunjukkan penurunan signifikan pada dosis 250 mg/L serbuk biji kelor. Semakin rendah nilai polidispersitas, maka indikator pengkondisian yang berlangsung semakin efektif dan efisien (Farkas & Krammar, 2021).

Pergeseran kurva yang semakin ke kanan (diameter semakin membesar) setelah penambahan biji kelor, dibuktikan dengan nilai D50 yang mengalami peningkatan seiring dengan penambahan biji kelor. Nilai D50 pada lumpur PAC tanpa biji kelor, dengan 250 mg/L serbuk biji kelor, dan 750 mg/L ekstrak biji kelor berturut-turut adalah 125,52 nm; 226,28 nm, dan 310 nm. Peningkatan ini menandakan bahwa proses aglomerasi dan pembentukan flok berlangsung lebih efektif ketika dikondisikan dengan biji kelor. Nilai D50 menunjukkan ukuran median partikel meningkat, artinya 50% dari partikel dalam suspensi memiliki ukuran lebih besar dibandingkan kondisi tanpa penambahan biji kelor (Houghton *et al.*, 2024).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa dosis 100 mg/L serbuk biji kelor merupakan dosis optimal untuk lumpur alum, sementara dosis 250 mg/L serbuk biji kelor memberikan hasil terbaik pada lumpur PAC. Keputusan ini didasarkan pada pengujian zeta potensial, kekeruhan supernatan, dan distribusi ukuran partikel (PSD). Pada lumpur alum, penambahan 100 mg/L serbuk biji kelor berhasil menurunkan nilai zeta potensial dari -23,36 mV menjadi sekitar -13,90 mV, mendekati titik netral yang ideal untuk flokulasi. Selain itu, kekeruhan supernatan menurun drastis dari 151 NTU menjadi 59,70 NTU, dan distribusi ukuran partikel mengalami peningkatan kurva menjadi curam, ditunjukkan dengan penurunan standar deviasi dari 15,62 nm menjadi 5,77 nm. Hal ini mengindikasikan bahwa pembentukan flok berlangsung secara efektif dengan ukuran partikel yang lebih kecil dan homogen.

Pada lumpur PAC, dosis optimal tercapai pada 250 mg/L serbuk biji kelor. Pada dosis ini, nilai zeta potensial mencapai -3,05 mV, menandakan terjadinya netralisasi muatan maksimum tanpa menimbulkan efek restabilisasi. Penurunan kekeruhan mencapai 12,68 NTU, lebih rendah dibanding dosis lainnya. Pada uji distribusi ukuran partikel (PSD), nilai D50

meningkat dari 125,52 nm (kontrol) menjadi 226,28 nm yang menandakan terbentuknya flok yang lebih besar dan stabil. Penurunan nilai polidispersitas (PdI) dari 2,208 menjadi 0,4291 menunjukkan bahwa distribusi partikel menjadi lebih seragam dan sistem lebih stabil. Kombinasi dari penurunan zeta potensial, kekeruhan rendah, dan karakteristik PSD yang mengarah ke flok besar dan homogen menjadikan dosis ini optimal untuk proses pengkondisian lumpur PAC.

Efektivitas kedua dosis tersebut didukung oleh mekanisme kerja utama biji kelor yaitu adsorpsi protein kationik dan *bridging flocculation* yang lebih dominan dalam bentuk serbuk dibandingkan ekstrak. Serbuk memiliki kandungan aktif lebih utuh, daya adsorpsi tinggi, dan permukaan kontak lebih luas dibandingkan ekstraknya. Oleh karena itu, penggunaan serbuk biji kelor pada dosis 100 mg/L untuk lumpur alum dan 250 mg/L untuk lumpur PAC terbukti sebagai solusi pengkondisi alami yang paling efisien dalam penelitian ini. Dengan adanya informasi pembuangan lumpur di IPAM Ngagel 1 Surabaya, maka dapat dilakukan perhitungan untuk penerapan kebutuhan biji kelor pada proses produksi dalam sehari. Jika diterapkan pada IPAM tersebut dengan rata-rata debit pembuangan lumpur mencapai 14.872 m³/hari, maka kebutuhan biji kelor dapat dihitung dengan mengalikan keduanya sehingga diperoleh sebesar 3.718 kg (3,7 ton) per hari. Jumlah ini menunjukkan bahwa apabila biji kelor digunakan secara penuh untuk pengkondisian seluruh volume lumpur harian, maka kebutuhan bahan baku dalam skala ton harus dipertimbangkan pada aspek penyediaan bahan baku, pengadaan lahan penyimpanan, serta keberlanjutan suplai biji kelor di sekitar instalasi pengolahan air. Sementara, untuk kebutuhan biji kelor per hari pada IPAM Legundi Gresik belum dapat dilakukan karena belum terdapat data historis pembuangan lumpur.

Pada penelitian ini, proses pengkondisian lumpur dilakukan pada lumpur unit akhir pengolahan air bersih yang mengandung Aluminium Sulfat (Alum) maupun *Poly Aluminium Chloride* (PAC), di mana lumpur tersebut memiliki karakteristik flokulasi akibat adanya interaksi koagulan dengan partikel tersuspensi. Apabila proses pengkondisian ini diterapkan pada lumpur hasil *outlet* prasedimentasi yang umumnya berupa lumpur tipe diskret, secara prinsip tetap dapat diaplikasikan. Hal ini disebabkan oleh adanya senyawa aktif utama dalam biji kelor berupa protein kationik dengan gugus amino bermuatan positif yang dapat berinteraksi secara elektrostatik dengan partikel lumpur yang umumnya bermuatan negatif, baik pada lumpur flokulasi maupun lumpur diskret.

Pada lumpur diskret, partikel mengendap secara individual tanpa membentuk agregat flok besar seperti lumpur hasil koagulasi-flokulasi. Namun, penambahan biji kelor tetap bermanfaat karena protein kationik di dalamnya dapat bertindak sebagai polielektrolit alami yang menetralkan muatan permukaan partikel dan menciptakan *bridging effect* (jembatan ikatan) antar partikel diskret sehingga terbentuk agregat yang lebih besar dan stabil. Interaksi ini terjadi melalui ikatan elektrostatik antara gugus $-NH_3^+$ pada protein kelor dengan gugus bermuatan negatif di permukaan partikel lumpur, serta adanya interaksi hidrofobik antara rantai samping protein dengan permukaan partikel. Oleh karena itu, penggunaan biji kelor pada lumpur diskret tetap dapat meningkatkan proses *dewatering* meskipun mekanisme flokulasi yang terbentuk tidak sebesar pada lumpur dengan kandungan koagulan kimia.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan pada penelitian ini diperoleh sebagai berikut:

1. Penambahan biji kelor (*Moringa oleifera*) pada lumpur yang mengandung koagulan kimia (PAC dan aluminium sulfat) memberi pengaruh pada removal kekeruhan, SVI, TSS, dan TS. Removal kekeruhan yang dihasilkan hingga 88,26% menunjukkan peningkatan efektivitas pemisahan padatan tersuspensi. Nilai SVI mengalami penurunan hingga 4,21%, nilai TSS mengalami penurunan dari 200 mg/L menjadi 50 mg/L, serta nilai TS mengalami peningkatan dari 0,4% menjadi 28,2% jika dibandingkan dengan lumpur tanpa penambahan biji kelor.
2. Hasil karakterisasi SEM-EDX menunjukkan struktur flok lumpur setelah penambahan biji kelor menjadi lebih besar, padat, dan kompak yang memperkuat proses pemisahan air jika dibandingkan lumpur tanpa penambahan biji kelor. Hasil FTIR mengonfirmasi keterlibatan gugus fungsional aktif (amina, hidroksil, alifatik, dan alkena) dari biji kelor yang berperan dalam netralisasi muatan dan pembentukan jembatan antar partikel (*bridging*) selama proses pengkondisian lumpur.
3. Dosis optimal serbuk biji kelor untuk lumpur alum adalah 100 mg/L dan lumpur PAC adalah 250 mg/L yang menghasilkan nilai SRF 0,019 m/kg dan 0,029 m/kg serta zeta potensial sebesar $-13,90 \pm 0,41$ mV dan $-3,05 \pm 0,25$ mV sebagaimana mendukung pembentukan flok yang lebih besar dan stabil. Serbuk biji kelor lebih efektif sebagaimana didukung oleh hasil analisis *Particle Size Analyzer* (PSA) yang semakin curam menunjukkan ukuran partikel flok lebih seragam setelah pengkondisian.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Mengkaji pengaruh variasi metode ekstraksi terhadap biji kelor, seperti pemanasan atau enzimatis untuk meningkatkan ketersediaan protein aktif dan efektivitasnya sebagai bahan pengkondisi lumpur.
2. Mengkaji dampak lingkungan residu lumpur pasca penambahan biji kelor, khususnya terkait potensi pemanfaatannya sebagai media tanam, substrat pengolahan air, bahan bakar alternatif, atau material konstruksi sehingga mendukung prinsip *zero waste*.
3. Menerapkan skala pilot atau lapangan untuk menguji efektivitas serbuk biji kelor dalam sistem pengolahan air secara kontinu, serta melakukan analisis kelayakan teknis, ekonomi, dan operasional di instalasi pengolahan air.

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulazeez, Q. M., Jami, M. S., & Alam, Md. Z. (2016). Effective Sludge Dewatering Using Moringa Oleifera Seed Extract Combined With Aluminium Sulfate. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(1), pp. 372-381.
- Achak, M., Elayadi, F., & Boumya, W. (2019). Chemical Coagulation/Flocculation Processes for Removal of Phenolic Compounds from Olive Mill Wastewater: A Comprehensive Review. *American Journal of Applied Sciences*, 16(3), pp. 59-91.
- Ademiluyi, J. O. (1988). Sludge Conditioning With Moringa Seed. *Environmental International*. 14, pp. 59-63.
- Addich, M., Fatni, A., Bouzrour, S., Baraka, N. E., Ousaa, A., Albrimi, Y. A., & Laknifli, A. (2024). Optimization of Coagulation-Flocculation In Urban Water Treatment Using *Moringa oleifera*. *Desalination and Water Treatment*, 320, pp. 1-6.
- Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, M. (2016). Sustainable Management Of Water Treatment Sludge Through 3‘R’ Concept. *Journal of Cleaner Production*, 124, pp. 1-13.
- Alaert, G. dan Santika, SS. (1984). Metode Penelitian Air. Usaha Nasional. Surabaya.
- Amaliasari, M. (2019). Perencanaan Unit Pengolahan Lumpur Aluminium Di IPAM. Undergraduate Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Aminah, N., Dewi, K., L, N. I. A., dan Samsuci. (2016). Rancang Bangun Alat Pengukur Kadar Keasaman Minuman Kemasan dan Kematangan Buah. *Jurnal ElektriKA*, 13(1), pp. 28–35.
- Amir, R. M., Anjum, F. M., Khan, M. I., Khan, M. R., Pasha, I., & Nadeem, M. (2013). Application of Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy for The Identification of Wheat Varieties. *Journal of Food Science Techonology*, 50(5), pp. 1018-1023.
- Anggarani, B. O. (2015). Peningkatan Efektivitas Proses Koagulasi-Flokulasi Dengan Menggunakan Aluminium Sulfat dan *PolyDADMAC*. Undergraduate Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Baidu. <https://baike.sogou.com/v10694326.htm>. Diakses pada 18 Januari 2025.
- Bangun, A. R., Aminah, S., Hurahae, A. A., & Ritonga, M. Y. (2013). Pengaruh Kadar Air, Dosis dan Lama Pengendapan Koagulan Serbuk Biji Kelor Sebagai Alternatif Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 2(1).
- Batista, G. S., Roledo, C., Odjegba, E. E., Fiore, F. A., Moruzzi, R. B., & Reis, A. G. D. (2023). *Moringa oleifera* Seed Addition Prior to Sludge Thickening for Supernatant Quality Improvement: Analyses of Clarification Performance and Toxicity. *Sustainability*, 15 (7228), pp. 1-11.
- Bhatia, S., Othman, Z., & Ahmad, A. L. (2007). Coagulation–Flocculation Process For POME Treatment Using Moringa Oleifera Seeds Extract: Optimization Studies. *Chemical Engineering Journal*, 133, pp. 205-212.
- Budi, S. S. (2006). Penurunan Fosfat Dengan Penambahan Kapur (Lime), Tawas Dan Filtrasi Zeolit Pada Limbah Cair. Graduate Thesis, Undip Pascasarjana.
- Budiman, A. Wahyudi, C. Irawati, W., & Hindarso, H. (2008). Kinerja Koagulan Poly Aluminium Chloride (PAC) Dalam Penjernihan Air Sungai Kalimas Surabaya Menjadi Air Bersih. *Widya Teknik*, 7(1), pp. 25-34.
- Chales, G. G., Tihameri, B. S., Milhan, N. V. M., Koga-Ito, C. Y., Antunes, M. L. P., & Reis, A. G. D. (2022). Impact of Moringa oleifera Seed-Derived Coagulants Processing Steps on Physicochemical, Residual Organic, and Cytotoxicity Properties of Treated Water. *Journal Water*, 14(1), pp. 1-14.

- Chuang, H. S., Liu, J. C., & Pan, J. R. (1997). Effect of Chemical Conditioning on Specific Resistance to Filtration of Sludge. *Water Research*, 31(7), pp. 1515-1520.
- Ciri-ciri Pohon. <https://www.ciriciripohon.com/2020/01/cici-ciri-pohon-kelor-di-alam-liar.html>. Diakses pada 19 Januari 2025.
- Crittenden, J. C., dkk. 2012. *MWH's Water Treatment: Principles and Design*, Third Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Eckenfelder, W. W. (2000). *Industrial Water Pollution Control*. McGraw-Hill.
- Faramayuda, F., Permana, J., Syam, A. K., & Elfahmi. (2021). Identification Secondary Metabolites from Callus *Piper retrofractum Vahl*. *Journal of Islamic Science and Technology*, 7(1), pp. 197-214.
- Farkas, N. & Kramar, J. A. (2021). Dynamic Light Scattering Distributions by Any Means. *Journal of Nanoparticle Research*, 23(120), pp. 1-11.
- Faza, Y., Djustiana, N., Cahyanto, A., Joni, I. M., & Usri, K. (2017). Nilai Ph Hidrolisis Pada Teknik Sol-Gel Terhadap Ukuran Dan Zeta Potensial Partikel Keramik Mullite Sebagai Bahan Pengisi Komposit Kedokteran Gigi. *Padjajaran J Dent Res Student*, 1(2), pp. 90-94.
- Feria, J. J., Ramirez, J., & Ballut, G. (2017). Comparison of the Sludge Volume Index (SVI) between a Natural Coagulant and Aluminium Sulfate. *International Journal of ChemTech Research*, (10)2, pp. 1037-1043.
- Foidl, N., Makkar, H. P. S., & Becker, K. (2001). The Potential of *Moringa oleifera* for Agricultural and Industrial Uses. *Research Gate*, pp. 1-20.
- Gea, O. B., Suada, I. K., & Merdana, I. M. (2019). Penggunaan Serbuk Biji Kelor untuk Penanganan Limbah Peternakan Sapi Ditinjau dari *Total Coliform* dan *Total Suspended Solid*. *Indonesia Medicus Veterinus*, 8(3), pp. 303-312.
- Gebbie, Peter. (2005). *A Dummy's Guide to Coagulants*, 68th Annual Water Industry Engineers and Operators, Conference Schweppes Centre, Bendigo.
- Ghebremichael, K. A. & Hultman, B. (2004). Alum Sludge Dewatering Using *Moringa oleifera* As A Conditioner. *Water, Air, and Soil Pollution*, 158, pp. 153-167.
- Ghebremichael, K. A., Gunaratna, K. R., Henriksson, H., Brumer, H., & Dalhammar, G. (2005). A simple purification and activity assay of the coagulant protein from *Moringa oleifera* seed. *Water Research*, 39(11), pp. 2338-2344.
- Ghebremichael, K. A., Gunaratna, K. R., Henriksson, H., Brumer, H., & Dalhammar, G. (2005). A Simple Purification and Activity Assay of The Coagulant Protein from *Moringa Oleifera* Seed. *Water Resources*, 39 (1), pp. 2338-2344.
- Gloria, Yemima. (2022). *Kajian Pemanfaatan Lumpur Alum sebagai Media Constructed Wetlands untuk Menurunkan Nutrien pada Efluen IPAL Komunal*. Undergraduate Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Gold, M., Dayer, P., Faye, M. C. A. S., Clair, G., Seck, A., Niang, S., Morgenroth, E., Strande, L. (2016). Locally Produced Natural Conditioners for Dewatering of Faecal Sludge. *Environ. Technol*, 37, pp. 2802-2814.
- Goldstein, J. et al. (2017). *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. Springer.
- González, M., et al. (2008). Effect Of Temperature On The Sludge Dewatering Process. *Journal of Environmental Management*, 87(3), pp. 545-550.
- Grunenwald, A., Keyser, C., Sautereau, A. M., Crubezy, E., Ludes, B., & Drouet, C. (2014). Revisiting carbonate quantification in apatite (bio)minerals: avalidated FTIR methodology. *Journal of Archaeological Science*, 49, pp. 134-141.
- Hak, A., Kurniasih, Y., dan Hatimah, H. (2018). Efektivitas Penggunaan Biji Kelor (*Moringa Oleífera*, Lam) Sebagai Koagulan Untuk Menurunkan Kadar TDS dan TSS Dalam Limbah Laundry. *Jurnal Kependidikan Kimia*, 6(2).

- Hannon, L., Kennelly, C., Mullins, D., Gordon, G., Mccann, B., & Clifford, E. (2015). Examination of Selected Alternative Settlement Tests at Small-scale Activated Sludge Plants. *American Journal of Public Health*, 105(11), pp. 2283-2290.
- Harahap, J., Ashari, T. M., & Munar, C. H. (2022). Pemanfaatan Serbuk Biji Kelor (*Moringa oleifera*) Sebagai Biokoagulan Pada Pengolahan Air Limbah Penatu. *AMINA*, 4(1), pp. 7-16.
- Helen, K., Hasyim, H., & Najmah. (2012). Efektifitas Koagulan Ekstrak Biji Kelor (*Moringa oleifera*) Terhadap Daya Hidup Ikan Mas (*Cyprinus Carpio L.*) pada Pengolahan Air Limbah Minyak Goreng Restoran Cepat Saji X Di Palembang. *Jurnal Ilmu Kesehatan Masyarakat*, 3(1), pp. 47-54.
- Heredia, J. B. & Martin, J. S. (2009). Removal Of Sodium Lauryl Sulphate By Coagulation/Flocculation with Moringa Oleifera Seed Extract. *Journal of Hazardous Materials*, 164, pp. 713-719.
- Houghton, J. E., Behnsen, J., Duller, R. A., Nichols, T. E., & Worden, R. H. (2024). Particle Size Analysis: A Comparison Of Laboratory-Based Techniques and Their Application to Geoscience. *Sedimentary Geology*, 464, pp. 1-18.
- Huang, C., & Shiu, H. (1996). Interactions between alum and organics in coagulation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 113, pp. 155–163.
- Husnah. (2016). Pengaruh Waktu Pengadukan Pelan Pada Koagulasi Air Rawa. *Jurnal Redoks*, 1(1), pp. 58-64.
- Hussain, J., Jami, M. S., & Muyibi, S. A. (2012). Enhancement of Dewatering Properties of Kaolin Suspension by Using Cationic Polyacrylamide (PAMC) Flocculant and Surfactants. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 6(1), pp. 70-73.
- Hutasoit, S., Panggabean, I., Turnip, N. J. R., Aditia, A. (2020). *Jurnal Ilmiah Maksitek*, 5(4), pp. 99-104.
- Inkson, B. J. (2016). Scanning Electron Microscopy (SEM) And Transmission Electron Microscopy (TEM) For Materials Characterization. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*, (2), pp. 17-43.
- Irfan. (2007). Recovery Alum Dari Lumpur Accelerator Instalasi Pengolahan Air Minum (Ipam) Gunung Pangilun Padang. Undergraduate Thesis, Universitas Andalas.
- J.W. Clark, W.Viessman, M.Hammer. (1977). *Water Supply and Pollution Control*, 3rd edition, Harper and Row, New York, pp.629.
- Julian, D. A., Lindu, M., & Winarni. (2015). Studi Pengolahan Lumpur Instalasi Pengolahan Air Minum Taman Kota - Jakarta Barat, 7(2), pp. 75-80.
- Kusuma, Rizqi Arie. (2019). Pengaruh Penambahan Tawas Terhadap Pengujian Kadar Air Limbah Lumpur Pabrik Pt.Sosro Kabupaten Semarang Dengan Metode Filtrasi. Undergraduate Thesis, Undip Vokasi.
- Kwaambwa, H. M., & Rennie, A. R. (2012). Interaction of *Moringa oleifera* Seed Protein with Surfactants and Its Effect on Zeta Potential and Turbidity of Water. *Biopolymers*, 97(4), pp. 201–210.
- Liu, Yongliang. (2013). Recent Progress in Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy Study of Compositional, Structural and Physical Attributes of Developmental Cotton Fibers. *Materials*, (6), pp. 299-313.
- M. Özacar and İ.A. Sengil. (2000). Effectiveness of tannins obtained from valonia as a coagulant aid for dewatering of sludge. *Water Res*, 34(4), pp. 1407–1412.
- Maghfiroh, K. & Utomo, D. (2019). Karakterisasi Senyawa Kompleks dengan Logam Transisi pada Mikropartikel Bunga Cempaka (*Magnolia Champaca* (L.) Baill. Ex Pierre) sebagai Kandidat Potensial Nutrasetikal. *Jurnal Teknologi Pangan*, 14(2), pp. 280-294.

- Makmur, M. Ariani, E. Saraswati, S. P. (2024). Perbandingan Jenis Koagulan Ferric Sulfate dan Ferric Chloride Dalam Penurunan Total Suspended Solid Air Limbah Silica-Coal, Simposium Nasional Teknologi Infrastruktur (pp. 1-6). Universitas Gadjah Mada.
- Mansour, Y. H., Othami, B., Rebah, F. B., Mnif, W., & Khadhraoui, M. (2024). Plant-Based Flocculants as Sustainable Conditioners for Enhanced Sewage Sludge Dewatering. *Journal of Water*, 16, pp. 1-16.
- Martin, J. S., Heredia, J. B., & Peres, J. A. (2012). Improvement of The Flocculation Process In Water Treatment By Using *Moringa oleifera* Seeds Extract. *Brazilian of Chemical Engineering*, 29(03), pp. 495-501.
- Masduqi, Ali dan Assomadi, A. F. (2019). Operasi dan Proses Pengolahan Air Edisi Kedua. Surabaya : ITS Press.
- Metcalf & Eddy. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Metcalf and Eddy. (2004). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4th edition, McGraw Hill, New York.
- Metcalf and Eddy. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse Recovery, 5th edition, McGraw Hill, New York.
- Miller, R. E., *et al.* (2007). Characterization Of Sludge And Its Disposal Options. *Journal of Environmental Engineering*, 134(12), pp. 1012-1018.
- Mohammad, T. A., Mohamed, E. H., Noor, M. J.M., & Ghazali, A. H. (2014). Dual Polyelectrolytes Incorporating *Moringa oleifera* In The Dewatering Of Sewage Sludge. *Desalination and Water Treatment*, 55(13), pp. 3613-3620.
- Mohammed, A. & Abdullah. (2018). Scanning Electron Microscopy (Sem): A Review. HERVEX, pp. 77-85.
- Moussas, P. A., & Zouboulis, A. I. (2009). A novel inorganic–organic composite coagulant based on polyferric sulfate and poly(diallyldimethylammonium chloride). *Water Research*, 43(16), 3511–3524.
- Mujiyanti, D. R., Surianthy, M. D., & Junaidi, A. B. (2019). Kajian Karakterisasi Nanosilika dari Tetraethylorthosilicate (TEOS) dengan Penambahan Polivinil Alkohol (PVA) Menggunakan *Scanning Electron Microscopy* dan *Particle Size Analyzer*. *Jurnal Fisika Flux*, 16, pp. 103-111.
- Munar, Cut Hidayatul. (2022). Pemanfaatan Serbuk Biji Kelor (*Moringa oleifera*) Sebagai Biokoagulan Pada Pengolahan Air Limbah Penatu. Undergraduate Thesis, Universitas Islam Negeri Ar-Raniry.
- Mutalib, M. A., Rahman, M. A., Othman, M. H. D., Ismail, A. F., Jaafar, J. (2017). Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy-Dispersive X-Ray (EDX) Spectroscopy. *Membrane Characterization*, (9), pp. 161-179.
- Nand, V., Maata, M., Koshy, K., & Sotheeswaran, S. (2012). *International Journal of Applied Science and Technology*, 2(5), pp. 125-129.
- Nandiyanto, A. B. D., Ragadhita, R., & Fiandini, M. (2023). Interpretation of Fourier Transform Infrared Spectra (FTIR): A Practical Approach in the Polymer/plastic Thermal Decomposition. *Indonesian Journal of Science & Technology*, 8(1), pp. 113-126.
- Ndabingengsere, A. & Narasiah, K. S. (1998). Quality Of Water Treated By Coagulation Using *Moringa Oleifera* Seeds. *Eselvier Science*, 32(3), pp. 781-791.
- Ndabingengsere, A., Narasiah, K. S., & Talbot, B. G. (1995). Active Agents and Mechanism Of Coagulation Of Turbid Waters Using *Moringa oleifera*. *Water Research*, 29(2), pp. 703-710.

- Nijhu, R. S., Khatun, A., & Hossen, Md. F. (2024). A Comprehensive Review of Particle Size Analysis Techniques. *International Journal of Pharmaceutical Research and Development*, 6(1), pp. 1-5
- Nouhi, S., Kwaambwa, H. M., Gutfreund, P., Rennie, A. R. (2019). Comparative Study of Flocculation and Adsorption Behaviour of Water Treatment Proteins from *Moringa Peregrina* And *Moringa Oleifera* Seeds. *Scientific Reports*, 9(1795), pp. 1-9.
- Nuryanti, Arizal, R., & Arrisujaya, D. (2017). Kandungan Kimia Dari Limbah Lumpur Instalasi Pengolahan Air Minum Untuk Beton Geopolimer Dengan XRF. *Jurnal Sains Natural Universitas Nusa Bangsa*, 7(2), pp. 48-57.
- Panjaitan, A. F., Sirait, A., & Tambun, R. (2024). Pengaruh Jenis Cairan, Jenis Batang, dan Panjang Batang pada Penentuan Distribusi Ukuran Partikel Bubuk Kaca Menggunakan Buoyancy Weighing-Bar Method (BWM). *Jurnal Teknik Kimia USU*, 13(1), pp. 48-53.
- Paula, H. M. D., Ilha, M. S. D. O., & Andrade, L. S. (2014). Concrete plant wastewater treatment process by coagulation combining aluminium sulfate and *Moringa oleifera* powder. *Journal of Cleaner Production*, pp. 76, 125-130.
- Paramita, V. D., Yuliani, H. R., Rosalin, & Purnama, I. (2021). Pengaruh Berbagai Metode Pengeringan Terhadap Kadar Air, Abu dan Protein Tepung Daun Kelor, Prosiding 5th Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat (pp. 1-6). Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- Pernitsky, D. J., & Edzwald, J. K. (2006). Selection of alum and polyaluminum coagulants: Principles and applications. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 55(2), 121–141.
- Pratiwi, R.D., et al. (2022). Potensi Biji Kelor sebagai Koagulan Nabati dalam Pengolahan Air Limbah. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(1), 55–64.
- Qomaruddin, Karnaningrum, N. & Vanany, I. (2013). Analisa Resiko *Clearator* IPAM Karang Pilang Iii Pdam Surya Sembada Kota Surabaya, Prosiding Seminar Nasional Manajemen Teknologi XVII (pp. 1-11). Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Rahardja, Rianti. (2013). Optimasi *Chemical Conditioning* Untuk meningkatkan Efisiensi *Dewatering* Lumpur Biologis Ipal PT Rohm And Haas Indonesia. Undergraduate Thesis, Universitas Indonesia.
- Rahayu, S. R., Pribadi, A., Nengse, S., Setyowati, R. D. N., & Utama, T. T. (2020). Perencanaan Unit Pengolahan Lumpur Di Intalasi Pengolahan Air Minum X Kota Surabaya. *Jurnal Teknologi Technoscience*, 13(1), pp. 76-82.
- Ramiah, Y. & Jeetah, P. (2015). Efficiency Of *Moringa Oleifera* And Polyaluminium Chloride For Sludge Thickening. *University of Mauritius Research Journal*, 21, pp. 1-23.
- Rustiah, W. dan Andriani, Y. (2018). Analisis Serbuk Biji Kelor (*Moringa oleifera*, Lamk) Dalam Menurunkan Kadar COD dan BOD Pada Air Limbah Jasa Laundry. *Indo. J. Chem. Res*, 5(2), pp. 96-100.
- Said, N. I., dan Utomo, K. (2007). Pengolahan Air Limbah Domestik dengan Proses Lumpur Aktif yang Diisi dengan Media Bioball. *Jurnal Air Indonesia*, 3 (2), 160-174.
- Santhi, K. & Sengottuvel, R. (2017). Functional group analysis of *Moringa concanensis* Nimmo (Moringaceae) by FTIR spectrum. *IOSR Journal of Pharmacy*, 7(1), pp. 28-33.
- Schwarz, Dishna. (2000). Water Clarification using *Moringa oleifera*. Gate Information Service. <http://www.gtz.de/gate/gateid.afp>.
- Setyawati, H., Kriswantono, M., Nisa, D. A., & Hastuti, R. (2017). Serbuk Biji Kelor Sebagai Koagulan Pada Proses Koagulasi Flokulasi Limbah Cair Pabrik Tahu. *Jurnal Teknik Industri Inovatif*, 7(2), pp. 1-6.

- Shan, T. C., Matar, M. A. M., Makky, E. A., & Ali, E. N. (2016). The Use of *Moringa oleifera* Seed As A Natural Coagulant For Wastewater Treatment And Heavy Metals Removal. *Applied Water Science*, 7(1), pp. 1369-1376.
- Shen, M., *et al.* (2009). Effects of sludge conditioning on the dewaterability and characteristics of dewatered cake. *Environmental Technology*, 30(2), 171-178.
- Sucahyo, S. E., Firdaus, N. A., dan Lintang, L. (2018). Pengelolaan dan Pemanfaatan Limbah Lumpur PDAM Cilacap. *Jurnal Georafflesia*, 3(2), pp. 81-88.
- Sulaiman, M., Zhigila, D. A., Mohammed, K., Umar, D. M., Aliyu, B., & Manan, F. A. (2019). Moringa Oleifera Seed as Alternative Natural Coagulant for Potential Application in Water Treatment: A Review. *Journal of Advanced Research in Materials Science*, 56(1), pp. 11-21.
- Susanto, R. (2008) Optimasi Koagulasi-Flokulasi Dan Analisis Kualitas Air Pada Industri Semen. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Tat, W. K., Idris, A., Noor, M. J. M. M., Mohamed, T. A., Ghazali, A. H., and Muyibi, S. A. (2010). Optimization Study On Sewage Sludge Conditioning Using Moringa Oleifera Seeds. *Desalination and Water Treatment*, 16:1-3, pp. 402-410.
- Tatsi, A.A., Zouboulis, A.I., Matis, K.A., & Samaras, P. (2003). Coagulation-Flocculation Pretreatment Of Sanitary Landfill Leachates. *Chemosphere*, 53, pp. 737-744.
- Tian, K., Liu, W. J., Qian, T. T., Jiang, H., Yu, H. Q. (2018). Investigation on the Evolution of N-Containing Organic Compounds during Pyrolysis of Sewage Sludge. *Environmental Science & Technology*, 182, pp. 37-44.
- Tricakra Chlorine System. <https://pt-tcs.com/product/poly-aluminium-chloride-powder/>. Diakses pada 18 Januari 2015.
- Tunggolou, J. & Payus, C. (2017). Moringa oleifera as Coagulant Used In Water Purification Process For Consumption. *Earth Science Pakistan*, 1(2), pp. 1-3.
- Valverde, K. C., Paccola, E. A. S., Pomini, A. M., Yamaguchi, N. U., & Bergamasco, R. (2018). Combined water treatment with extract of natural *Moringa oleifera* Lam and synthetic coagulant. *Revista Ambiente & Agua*, 13(3), pp. 1-11.
- Van De Voort, F. R. (1992). Fourier Transform Infrared Spectroscopy Applied to Food Analysis. *Food Research International*, pp. 397-403.
- Wahyudin. (2001). Uji Kelayakan Recovery Alum Pada Lumpur Hasil Proses Koagulasi – Flokuasi Di IPAM Ngagel III Surabaya. Undergraduate Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Widiawati, S., Ardistrya, F. B., Aktawan, A., & Chusna, F. M. A. (2024). Perbandingan Tawas Dan Poly Aluminium Chloride (PAC) Pada Pengolahan Limbah Cair Industri Tempe (hlm. 1-8). Jakarta: Universitas Muhammadiyah Jakarta.
- Yin, C. Y. (2010). Emerging Usage Of Plant-Based Coagulants For Water And Wastewater Treatment. *Process Biochemistry*, 45, pp. 1437-1444.
- Zaid, A. Q., Ghazali, S. B., Mutamim, N. S. A., & Olalere, O. A. (2019). Experimental Optimization Of *Moringa oleifera* Seed Powder as Bio-Coagulants in Water Treatment Process. *Spring Nature Journal*, 504(1), pp. 1-5.
- Zhao, Y. Q., Babatunde, A. O., Hu, Y. S., Kumar, J. I. G., & Zhao, X. H. (2011). Pilot Field-Scale Demonstration of A Novel Alum Sludge-Based Constructed Wetland System for Enhanced Wastewater Treatment. *Process Biochemistry*, 46(1), pp. 278-283.
- Zhuo, Q., Liu, W., Xu, H., & Wang, D. (2022). Effect of particle size distribution on filter cake pore structure and coal slurry dewatering process. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 42(6), pp. 1879-1894.
- Zouboulis, A. & Traskas, G. (2005). Comparable evaluation of various commercially available aluminium-based coagulants for the treatment of surface water and for the post-treatment

of urban wastewater. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 80, pp. 1136-1147.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN 1

PROSEDUR ANALISIS PARAMETER PENGUJIAN

- **Prosedur Analisis pH dan suhu**

- I. Alat dan Bahan

- 1. OHAUS (Starter ST3100M-F)
 - 2. Blanko (akuades)
 - 3. Sampel lumpur

- II. Prosedur Percobaan

- 1. Menyalakan tombol power “Exit”.
 - 2. Memilih probe untuk pH.
 - 3. Memasukkan probe dalam sampel lumpur.
 - 4. Menekan tombol “READ”.
 - 5. Mencatat hasil pH dan suhu yang tertera pada layar.

- **Prosedur Analisis Kekeruhan**

- I. Alat dan Bahan

- 1. Turbidimeter (EUTECH TN-100 Waterproof Turbidimeter)
 - 2. Blanko (akuades)
 - 3. Sampel Lumpur

- II. Prosedur Percobaan

- 1. Menyalakan tombol “ON”, lalu memasukkan blanko dan menekan “CAL”.
 - 2. Mengeluarkan blanko dari tabung, lalu memasukkan sampel lumpur.
 - 3. Menekan “READ” hingga muncul angka pada layar.
 - 4. Mencatat hasil kekeruhan (NTU).
 - 5. Membersihkan tabung sampel dengan akuades dan tisu.

- **Prosedur Analisis *Sludge Volume Index* (SVI)**

- I. Alat dan Bahan

- 1. Gelas ukur 1000 mL
 - 2. Pengaduk
 - 3. Sampel lumpur

- II. Prosedur Percobaan

- 1. Sampel lumpur dituangkan sebanyak 500 mL ke dalam gelas ukur 1000 mL.
 - 2. Sampel diaduk hingga homogen, lalu didiamkan selama 30 menit.
 - 3. Mencatat volume endapan lumpur.

- **Prosedur Analisis *Total Suspended Solids* (TSS)**

- I. Alat dan Bahan

- 1. Furnace
 - 2. Oven
 - 3. Cawan porselen
 - 4. Desikator
 - 5. Kertas saring
 - 6. Vacuum filter

7. Timbangan analitik
8. Sampel lumpur

II. Prosedur Percobaan

1. Memasukkan cawan porselen pada furnace 550°C selama 1 jam.
2. Memasukkan cawan porselen yang telah di furnace dan kertas saring ke dalam oven 105°C selama 15 menit. Kemudian, diletakkan dalam desikator selama 15 menit dan ditimbang dengan neraca analitik masing-masing.
3. Sampel dituangkan sebanyak 10 mL di kertas saring yang telah diletakkan pada *vacuum filter*. Sampel disaring dengan *vacuum filter* hingga airnya habis.
4. Kertas saring berisi padatan diletakkan pada cawan, lalu dimasukkan oven 105°C selama 1 jam, lalu didinginkan dalam desikator selama 15 menit.
5. Kertas saring ditimbang dengan timbangan analitik sehingga diperoleh TSS.

• Prosedur Analisis *Total Solids* (TS)

I. Alat dan Bahan

1. Furnace
2. Oven
3. Cawan porselen
4. Desikator
5. Kertas saring
6. *Vacuum filter*
7. Timbangan analitik
8. Sampel lumpur

II. Prosedur Percobaan

1. Memasukkan cawan porselen pada furnace 550°C selama 1 jam, kemudian dimasukkan dalam oven 105°C selama 15 menit. Cawan porselen didesikator selama 15 menit, kemudian ditimbang dengan neraca analitik.
2. Menuangkan sampel lumpur sebanyak 10 mL dalam cawan yang telah ditimbang.
3. Cawan berisi sampel dimasukkan ke dalam oven 105°C selama 24 jam, kemudian didesikator selama 15 menit.
4. Cawan berisi sampel ditimbang dengan neraca analitik sehingga diperoleh hasil TS.

• Prosedur Analisis Zeta Potensial

I. Alat dan Bahan

1. Sampel lumpur
2. Air Deionisasi

II. Prosedur Percobaan

1. Mengencerkan sampel lumpur dengan air deionisasi, kemudian dihomogenkan dan diambil bagian supernatan untuk diuji.
2. Membersihkan sel dan elektroda dan dipastikan kering sebelum digunakan.
3. Memasukkan sampel ke dalam sel dengan menghindari gelembung udara.
4. Membuka perangkat lunak Malvern ZS XPLOER, memilih mode zeta potential dan jenis sel DTS1070. Mengatur parameter suhu, material RI, material absorption, dll.
5. Memasukkan sel ke alat, lalu pengukuran dijalankan hingga selesai.
6. Menyimpan dan mencatat hasil zeta potensial.
7. Membilas sel dengan air deionisasi, lalu dikeringkan dan disimpan kembali.

- **Prosedur Analisis SEM-EDX**

- I. Alat dan Bahan

- 1. Sampel lumpur
 - 2. Air Deionisasi

- II. Prosedur Percobaan

- 1. Mengeringkan sampel berbentuk padatan/serbuk, lalu memasang sampel pada stub SEM menggunakan carbon tape atau lem konduktif.
 - 2. Melapisi sampel dengan *coating AuPd* untuk mencegah akumulasi muatan listrik.
 - 3. Memasukkan stub sampel ke *chamber* SEM. *Vacuum chamber* hingga tekanan optimal tercapai.
 - 4. Mengatur tegangan akselerasi elektron, lalu memfokuskan dan mengatur magnifikasi sesuai kebutuhan.
 - 5. Mengamati morfologi permukaan sampel dan mengambil gambar yang diinginkan.
 - 6. Mengaktifkan detektor EDX, lalu memilih area spesifik pada gambar SEM untuk analisis elemen. Dilanjutkan pengumpulan data spektrum energi sinar-X.
 - 7. Mengidentifikasi unsur-unsur berdasarkan spektrum energi, lalu menghitung presentase berat atau atomik unsur dalam sampel.

- **Prosedur Analisis FTIR**

- I. Alat dan Bahan

- 1. Sampel lumpur
 - 2. Air Deionisasi

- II. Prosedur Percobaan

- 1. Memilih jenis sampel cair, lalu meletakkan sampel langsung pada kristal ATR.
 - 2. Mengatur rentang gelombang ($4000-400\text{ cm}^{-1}$), resolusi, dan jumlah scan yang diinginkan.
 - 3. Menjalankan pemindaian spektrum FTIR. Dipastikan spektrum background telah diambil sebelumnya.
 - 4. Mengidentifikasi puncak serapan gugus fungsi yang muncul.

- **Prosedur Analisis PSD**

- I. Alat dan Bahan

- 1. Sampel lumpur
 - 2. Air Deionisasi

- II. Prosedur Percobaan

- 1. Mengambil sampel berbentuk cair, lalu dihomogenkan untuk memastikan distribusi partikel merata dan tidak menggumpal.
 - 2. Menghidupkan alat PSA dan melakukan kalibrasi sesuai prosedur.
 - 3. Memasukkan sampel ke dalam sel pengukuran alat PSA.
 - 4. Mengatur parameter, seperti jenis cairan pembawa, konsentrasi sampel, dan waktu pengukuran.
 - 5. Menjalankan pengukuran untuk memperoleh distribusi ukuran partikel.
 - 6. Menyajikan hasil grafik distribusi ukuran partikel dan data statistik (mean, median, D10, dan lainnya).
 - 7. Membersihkan sel pengukuran setelah selesai untuk menghindari kontaminasi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN 2

PERHITUNGAN KEBUTUHAN SERBUK DAN EKSTRAK BIJI KELOR

A. Serbuk

- Persamaan:
$$\text{Jumlah biji kelor (g)} = \text{Dosis (mg/L)} \times \text{Total Volume Sampel (L)}$$
- Perhitungan:
 1. Untuk 100 mg/L
$$\begin{aligned}\text{Jumlah biji kelor (g)} &= 100 \text{ mg/L} \times 0,5 \text{ L} \\ &= 50 \text{ mg} \approx 0,05 \text{ g}\end{aligned}$$
 2. Untuk 250 mg/L
$$\begin{aligned}\text{Jumlah biji kelor (g)} &= 250 \text{ mg/L} \times 0,5 \text{ L} \\ &= 125 \text{ mg} \approx 0,125 \text{ g}\end{aligned}$$
 3. Untuk 500 mg/L
$$\begin{aligned}\text{Jumlah biji kelor (g)} &= 500 \text{ mg/L} \times 0,5 \text{ L} \\ &= 250 \text{ mg} \approx 0,25 \text{ g}\end{aligned}$$
 4. Untuk 750 mg/L
$$\begin{aligned}\text{Jumlah biji kelor (g)} &= 750 \text{ mg/L} \times 0,5 \text{ L} \\ &= 375 \text{ mg} \approx 0,375 \text{ g}\end{aligned}$$
 5. Untuk 1000 mg/L
$$\begin{aligned}\text{Jumlah biji kelor (g)} &= 1000 \text{ mg/L} \times 0,5 \text{ L} \\ &= 500 \text{ mg} \approx 0,5 \text{ g}\end{aligned}$$
 6. Untuk 2500 mg/L
$$\begin{aligned}\text{Jumlah biji kelor (g)} &= 2500 \text{ mg/L} \times 0,5 \text{ L} \\ &= 1250 \text{ mg} \approx 1,25 \text{ g}\end{aligned}$$
 7. Untuk 5000 mg/L
$$\begin{aligned}\text{Jumlah biji kelor (g)} &= 5000 \text{ mg/L} \times 0,5 \text{ L} \\ &= 2500 \text{ mg} \approx 2,5 \text{ g}\end{aligned}$$

B. Ekstrak

- Diketahui: (Tat *et al.*, 2010)
Sebanyak 10 gram biji kelor bubuk dilarutkan dalam 200 mL akuades menghasilkan larutan stok 50.000 mg/L (5%).
- Dibutuhkan:
Sebanyak 100 mg/L – 5000 mg/L (0,01 – 0,5%).
- Persamaan:
$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

Dengan =
 M_1 adalah konsentrasi larutan stok

V_1 adalah V stok yang dibutuhkan
 M_2 adalah konsentrasi yang diinginkan
 V_2 adalah total volume akhir sampel

- Perhitungan:

1. Untuk 100 mg/L
 $50.000 \text{ mg/L} \times V_1 = 100 \text{ mg/L} \times 500 \text{ mL}$
 $V_1 = 1 \text{ mL}$
2. Untuk 250 mg/L
 $50.000 \text{ mg/L} \times V_1 = 250 \text{ mg/L} \times 500 \text{ mL}$
 $V_1 = 2,5 \text{ mL}$
3. Untuk 500 mg/L
 $50.000 \text{ mg/L} \times V_1 = 500 \text{ mg/L} \times 500 \text{ mL}$
 $V_1 = 5 \text{ mL}$
4. Untuk 750 mg/L
 $50.000 \text{ mg/L} \times V_1 = 750 \text{ mg/L} \times 500 \text{ mL}$
 $V_1 = 7,5 \text{ mL}$
5. Untuk 1000 mg/L
 $50.000 \text{ mg/L} \times V_1 = 1000 \text{ mg/L} \times 500 \text{ mL}$
 $V_1 = 10 \text{ mL}$
6. Untuk 2500 mg/L
 $50.000 \text{ mg/L} \times V_1 = 2500 \text{ mg/L} \times 500 \text{ mL}$
 $V_1 = 25 \text{ mL}$
7. Untuk 5000 mg/L
 $50.000 \text{ mg/L} \times V_1 = 5000 \text{ mg/L} \times 500 \text{ mL}$
 $V_1 = 50 \text{ mL}$

LAMPIRAN 3

PROSEDUR PEROLEHAN BIJI KELOR DAN SAMPLING

- **Prosedur perolehan biji kelor :**

- I. Alat dan Bahan

- 1. Biji Kelor
 - 2. Oven
 - 3. Blender
 - 4. Ayakan 70 mesh
 - 5. Akuades
 - 6. *Vacuum filter*
 - 7. Kertas saring
 - 8. Wadah

- II. Prosedur Percobaan

- 1. Biji kelor yang telah dikupas kulitnya, dikeringkan di oven 45°C selama 24 jam.
 - 2. Biji kelor dihaluskan dengan blender.
 - 3. Biji kelor diayak dengan ayakan 70 mesh, lalu dikering anginkan (serbuk).
 - 4. Sebanyak 10 gram serbuk biji kelor dilarutkan dalam 200 mL akuades, kemudian diblender dengan kecepatan maksimal selama 1 menit.
 - 5. Diambil filtratnya melalui penyaringan dengan *vacuum filter*.
 - 6. Diperoleh filtrat zat aktif biji kelor (ekstrak).

- **Prosedur sampling :**

- I. Alat dan Bahan

- 1. *Jerrycan* 25 L
 - 2. Gayung
 - 3. Pengaduk lumpur
 - 4. *Beaker glass*

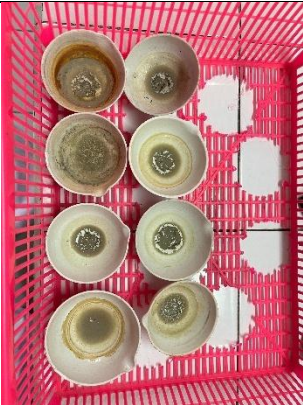
- II. Prosedur Percobaan

- 1. Menyiapkan *jerrycan* 25 L dan gayung yang sudah dipastikan bersih dan kering.
 - 2. Mengambil sampel lumpur pada outlet pipa unit sedimentasi (lumpur alum) dan unit clearator (lumpur PAC). Sampling pada rentang jam 05.00-09.00 WIB supaya mewakili kondisi operasional harian IPAM.
 - 3. Menutup rapat *jerrycan* dan mencatat informasi lokasi, waktu, dan jenis sampel.
 - 4. Menuangkan sampel lumpur ke dalam masing-masing 8 beaker glass sebanyak 500 mL sambil dihomogenkan. Delapan (8) beaker glass atau sekali *running* berlaku untuk setiap jenis lumpur dan bentuk biji kelor. Dalam penelitian ini, *running* dilakukan sebanyak 4 kali.
 - 5. Setiap *beaker glass* ditambahkan dosis serbuk maupun ekstrak biji kelor yang telah ditentukan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN 4 DOKUMENTASI PENELITIAN

		
Pengovenan biji kelor	Pengayakan biji kelor (70 mesh)	Serbuk Biji Kelor yang Digunakan
		
Pembuatan ekstrak zat aktif biji kelor	Ekstrak Biji Kelor yang Digunakan	Pengambilan sampel lumpur alum
		
Pengambilan sampel lumpur PAC	Pengujian pH dan suhu	Pengujian kekeruhan

		
Pengujian TSS	Pengujian TS	Penimbangan dengan neraca analitik
		
Alat <i>vacuum filter</i>	Alat uji Zeta Potensial	Alat uji SEM-EDX
		
Alat uji FTIR	Alat uji PSD	Proses Jar Test

LAMPIRAN 5 HASIL PENGUJIAN PARAMETER

- Hasil Uji Parameter *Sludge Volume Index* (SVI)

Lumpur Alum

Dosis Kelor (mg/L)	Variasi Bentuk Kelor		% Volume terendapkan		SVI (mL/g)	
	Serbuk	Ekstrak	Serbuk	Ekstrak	Serbuk	Ekstrak
0	95	95	19	19	678,57	678,57
100	94	93	18,6	18,6	671,43	664,29
250	94	92	18,4	18,4	671,43	657,14
500	93	92	18,4	18,4	664,29	657,14
750	93	91	18,2	18,2	664,29	650,00
1000	92	90,5	18,1	18,1	657,14	646,43
2500	93	90	18	18	664,29	642,86
5000	94	91	18,2	18,2	671,43	650,00

Nama sampel	% Volume terendapkan	SVI (mL/g)	Nama sampel	% Volume terendapkan	SVI (mL/g)
A0 (a)	19	679	B0 (a)	19	679
A1 (a)	18,6	671	B1 (a)	18,6	664
A2 (a)	18,4	671	B2 (a)	18,4	657
A3 (a)	18,4	664	B3 (a)	18,4	657
A4 (a)	18,2	664	B4 (a)	18,2	650
A5 (a)	18,1	657	B5 (a)	18,1	646
A6 (a)	18	664	B6 (a)	18	643
A7 (a)	18,2	671	B7 (a)	18,2	650

Lumpur PAC

Dosis Kelor (mg/L)	Variasi Bentuk Kelor		% Volume terendapkan		SVI (mL/g)	
	Serbuk (mL)	Ekstrak (mL)	Serbuk	Ekstrak	Serbuk	Ekstrak
0	95	95	19	19	475,00	475,00
100	94	93	18,6	18,6	470,00	465,00
250	94	92	18,4	18,4	470,00	460,00
500	93	92	18,4	18,4	465,00	460,00
750	93	91	18,2	18,2	465,00	455,00
1000	92	90	18	18	460,00	450,00
2500	94	90	18	18	470,00	450,00
5000	94,5	92	18,4	18,4	472,50	460,00

Nama sampel	% Volume terendapkan	SVI (mL/g)	Nama sampel	% Volume terendapkan	SVI (mL/g)
A0 (p)	19	475,00	B0 (p)	19	475,00
A1 (p)	18,6	470,00	B1 (p)	18,6	465,00
A2 (p)	18,4	470,00	B2 (p)	18,4	460,00
A3 (p)	18,4	465,00	B3 (p)	18,4	460,00
A4 (p)	18,2	465,00	B4 (p)	18,2	455,00
A5 (p)	18	460,00	B5 (p)	18	450,00
A6 (p)	18	470,00	B6 (p)	18	450,00
A7 (p)	18,4	472,50	B7 (p)	18,4	460,00

- **Hasil Uji Parameter pH dan Suhu**

Lumpur Alum

Nama Sampel	Serbuk		Nama Sampel	Ekstrak	
	pH	Suhu (°C)		pH	Suhu (°C)
A0 (a)	6,97	30	B0 (a)	6,97	30
A1 (a)	6,97	30,2	B1 (a)	6,98	29,6
A2 (a)	6,94	30	B2 (a)	6,92	29,6
A3 (a)	6,91	29,9	B3 (a)	6,89	29,6
A4 (a)	6,89	29,8	B4 (a)	6,91	29,5
A5 (a)	6,86	30	B5 (a)	6,88	29,5
A6 (a)	6,84	30,2	B6 (a)	6,85	29,5
A7 (a)	6,84	30,3	B7 (a)	6,73	29,5

Lumpur PAC

Nama Sampel	Serbuk		Nama Sampel	Ekstrak	
	pH	Suhu (°C)		pH	Suhu (°C)
A0 (p)	7,06	30,3	B0 (p)	7,06	30,3
A1 (p)	7,2	30,6	B1 (p)	7,06	30,5
A2 (p)	7,04	30,4	B2 (p)	7,13	30,7
A3 (p)	7,17	30,4	B3 (p)	7,11	30,6
A4 (p)	7,05	30,5	B4 (p)	7,13	30,3
A5 (p)	6,98	30,5	B5 (p)	6,99	30,3
A6 (p)	6,99	30,5	B6 (p)	6,97	30,4
A7 (p)	6,94	30,6	B7 (p)	6,98	30,3

- **Hasil Uji Parameter Kekeruhan**

Lumpur Alum

Nama Sampel	Serbuk	Nama Sampel	Ekstrak
	Kekeruhan (NTU)		Kekeruhan (NTU)
A0 (a)	151,00	B0 (a)	151,00
A1 (a)	59,70	B1 (a)	62,20
A2 (a)	29,40	B2 (a)	51,50
A3 (a)	24,80	B3 (a)	29,20
A4 (a)	19,50	B4 (a)	27,10
A5 (a)	22,70	B5 (a)	25,10
A6 (a)	23,30	B6 (a)	23,80
A7 (a)	32,80	B7 (a)	34,70

Lumpur PAC

Nama Sampel	Serbuk	Nama Sampel	Ekstrak
	Kekeruhan (NTU)		Kekeruhan (NTU)
A0 (p)	82,80	B0 (p)	82,80
A1 (p)	18,20	B1 (p)	19,60
A2 (p)	12,68	B2 (p)	18,60
A3 (p)	11,16	B3 (p)	16,60
A4 (p)	10,82	B4 (p)	14,50
A5 (p)	13,56	B5 (p)	13,76
A6 (p)	23,00	B6 (p)	9,72
A7 (p)	32,50	B7 (p)	31,70

- **Hasil Uji Parameter *Total Suspended Solids* (TSS)**

Lumpur Alum

Dosis Kelor (mg/L)	Serbuk			TSS (mg/L)	Ekstrak		
	Sebelum (gr)	Setelah (gr)	Hasil		Sebelum (gr)	Setelah (gr)	Hasil
0	0,1754	0,1768	0,0014	140	0,1825	0,1839	0,0014
100	0,1746	0,1758	0,0012	120	0,1926	0,1937	0,0011
250	0,1786	0,1797	0,0011	110	0,1792	0,1802	0,001
500	0,1745	0,1755	0,001	100	0,1822	0,183	0,0008
750	0,175	0,1759	0,0009	90	0,1822	0,1828	0,0006
1000	0,1725	0,1733	0,0008	80	0,1885	0,189	0,0005
2500	0,1759	0,1771	0,0012	120	0,1819	0,1822	0,0003
5000	0,1775	0,1788	0,0013	130	0,1883	0,1895	0,0012

Lumpur PAC

Dosis Kelor (mg/L)	Serbuk			TSS (mg/L)	Ekstrak		
	Sebelum (gr)	Setelah (gr)	Hasil		Sebelum (gr)	Setelah (gr)	Hasil
0	0,1723	0,1743	0,002	200	0,1821	0,1841	0,002
100	0,1798	0,1816	0,0018	180	0,1857	0,1874	0,0017

Dosis Kelor (mg/L)	Serbuk			TSS (mg/L)	Ekstrak		
	Sebelum (gr)	Setelah (gr)	Hasil		Sebelum (gr)	Setelah (gr)	Hasil
250	0,1786	0,1799	0,0013	130	0,1814	0,1826	0,0012
500	0,1745	0,1755	0,001	100	0,1812	0,1821	0,0009
750	0,1744	0,1752	0,0008	80	0,1855	0,1862	0,0007
1000	0,1712	0,1719	0,0007	70	0,1929	0,1935	0,0006
2500	0,1738	0,1753	0,0015	150	0,184	0,1845	0,0005
5000	0,1761	0,1777	0,0016	160	0,1888	0,1902	0,0014

- Hasil Uji Parameter *Total Solids* (TS)

Lumpur Alum

Dosis Kelor (mg/L)	Serbuk			TS (mg/L)	Ekstrak			TS (mg/L)
	Sebelum (gr)	Setelah (gr)	Hasil		Sebelum (gr)	Setelah (gr)	Hasil	
0	35,8308	35,8926	0,0618	6180	35,8252	35,8978	0,0726	7260
100	30,3514	30,4133	0,0619	6190	30,3487	30,4216	0,0729	7290
250	43,2131	43,2784	0,0653	6530	43,2116	43,285	0,0734	7340
500	24,5805	24,6497	0,0692	6920	24,5797	24,6537	0,074	7400
750	36,0998	36,171	0,0712	7120	36,0984	36,1732	0,0748	7480
1000	42,5598	42,632	0,0722	7220	42,559	42,634	0,075	7500
2500	44,5764	44,6573	0,0809	8090	44,5732	44,6483	0,0751	7510
5000	32,554	32,6593	0,1053	10530	32,5525	32,628	0,0755	7550

Lumpur PAC

Dosis Kelor (mg/L)	Serbuk			TS (mg/L)	Ekstrak		
	Sebelum (gr)	Setelah (gr)	Hasil		Sebelum (gr)	Setelah (gr)	Hasil
0	35,8226	35,8457	0,0231	2310	27,9814	28,0097	0,0283
100	30,3471	30,3741	0,027	2700	34,4094	34,4379	0,0285
250	43,2066	43,2352	0,0286	2860	32,0678	32,0968	0,029
500	24,5786	24,6107	0,0321	3210	30,4738	30,503	0,0292
750	36,0952	36,1286	0,0334	3340	26,3651	26,3948	0,0297
1000	42,5568	42,5916	0,0348	3480	29,6508	29,6812	0,0304
2500	44,5704	44,6169	0,0465	4650	43,669	43,7007	0,0317
5000	32,5513	32,6191	0,0678	6780	38,7882	38,8245	0,0363

- Hasil Uji Parameter *Specific Resistance to Filtration* (SRF)

Lumpur Alum

Dosis Kelor (mg/L)	Serbuk (Volume Filtrat yang diperoleh Saat Waktu ke-)								Dosis Kelor (mg/L)	Ekstrak (Volume Filtrat yang diperoleh Saat Waktu ke-)							
	15	30	45	60	90	120	150	180		15	30	45	60	90	120	150	180
	s									s							
0	4,9952	8,1396	9,0335	9,5681	9,9251	9,9251	9,9251	9,9251	0	4,6812	7,4438	8,0932	8,5311	8,8092	9,0812	9,9373	9,9373
100	5,1231	9,0003	9,5672	9,7937	9,925	9,925	9,925	9,925	100	4,8597	7,6037	8,3335	8,7364	9,9288	9,9288	9,9288	9,9288
250	5,5275	9,3458	9,7199	9,8739	9,9243	9,9243	9,9243	9,9243	250	4,9631	7,7465	8,5781	8,9682	9,9271	9,9271	9,9271	9,9271
500	5,8039	9,6022	9,8204	9,9217	9,9217	9,9217	9,9217	9,9217	500	4,9989	7,9308	8,7824	9,3309	9,9268	9,9268	9,9268	9,9268
750	6,1697	9,8299	9,8965	9,9188	9,9188	9,9188	9,9188	9,9188	750	5,2465	8,2883	8,9475	9,9286	9,9286	9,9286	9,9286	9,9286
1000	6,5741	9,8371	9,9173	9,9173	9,9173	9,9173	9,9173	9,9173	1000	5,4962	8,3535	9,0052	9,9305	9,9305	9,9305	9,9305	9,9305
2500	7,7207	9,8707	9,9109	9,9109	9,9109	9,9109	9,9109	9,9109	2500	5,5997	8,2764	9,3492	9,9309	9,9309	9,9309	9,9309	9,9309
5000	8,3789	9,8879	9,8933	9,8933	9,8933	9,8933	9,8933	9,8933	5000	7,3974	9,9302	9,9302	9,9302	9,9302	9,9302	9,9302	9,9302

Dosis Kelor (mg/L)	Waktu ke-								Slope	Intercept	SRF (m/kg)	Dosis Kelor (mg/L)	Waktu ke-								Slope	Intercept	SRF (m/kg)
	15	30	45	60	90	120	150	180					15	30	45	60	90	120	150	180			
	t/V												t/V										
0	3,204	4,030	5,560	7,033	10,217	13,214	15,095	18,114	2,691	-12,815	0,027	0	3,204	4,030	5,560	7,033	10,217	13,214	15,095	18,114	2,691	-12,815	0,027
100	2,928	3,333	4,704	6,126	9,065	12,086	15,113	18,136	1,868	-8,151	0,019	100	3,087	3,945	5,400	6,868	9,065	12,086	15,108	18,129	2,359	-11,210	0,024
250	2,714	3,210	4,630	6,077	9,066	12,088	15,114	18,137	1,927	-8,988	0,019	250	3,022	3,873	5,246	6,690	9,066	12,088	15,110	18,132	2,365	-11,528	0,024
500	2,584	3,124	4,582	6,047	9,066	12,088	15,118	18,142	1,934	-9,250	0,019	500	3,001	3,783	5,124	6,430	9,066	12,088	15,111	18,133	2,275	-11,024	0,023
750	2,431	3,052	4,547	6,049	9,065	12,086	15,123	18,147	2,011	-10,159	0,020	750	2,859	3,620	5,029	6,043	9,065	12,086	15,108	18,129	2,191	-10,757	0,022
1000	2,282	3,050	4,538	6,050	9,063	12,084	15,125	18,150	2,287	-12,911	0,023	1000	2,729	3,591	4,997	6,042	9,063	12,084	15,105	18,126	2,343	-12,269	0,023
2500	1,943	3,039	4,540	6,054	9,063	12,083	15,135	18,162	3,626	-26,172	0,036	2500	2,679	3,625	4,813	6,042	9,063	12,083	15,104	18,125	2,331	-12,291	0,023
5000	1,790	3,034	4,549	6,065	9,063	12,084	15,162	18,194	5,267	-42,368	0,053	5000	2,028	3,021	4,532	6,042	9,063	12,084	15,105	18,127	3,033	-20,411	0,030

Lumpur PAC

Dosis Kelor (mg/L)	Serbuk (Volume Filtrat yang diperoleh Saat Waktu ke-)								Dosis Kelor (mg/L)	Ekstrak (Volume Filtrat yang diperoleh Saat Waktu ke-)							
	15	30	45	60	90	120	150	180		15	30	45	60	90	120	150	180
	s									s							
0	5,7453	7,3146	8,2381	8,6994	9,1217	9,9757	9,9757	9,9757	0	5,8758	8,2261	8,3474	8,5329	8,8149	9,9733	9,9733	9,9733
100	5,8121	7,5728	8,7251	9,2266	9,9753	9,9753	9,9753	9,9753	100	6,3969	8,7438	9,0131	9,4401	9,973	9,973	9,973	9,973
250	6,2735	7,8583	9,0941	9,9751	9,9751	9,9751	9,9751	9,9751	250	6,5907	8,2061	9,3251	9,9732	9,9732	9,9732	9,9732	9,9732
500	6,5208	8,1726	9,2801	9,9744	9,9744	9,9744	9,9744	9,9744	500	6,9545	8,5497	9,9728	9,9728	9,9728	9,9728	9,9728	9,9728
750	6,8391	8,9853	9,9718	9,9718	9,9718	9,9718	9,9718	9,9718	750	7,0023	9,1974	9,9716	9,9716	9,9716	9,9716	9,9716	9,9716
1000	7,1699	8,9332	9,9702	9,9702	9,9702	9,9702	9,9702	9,9702	1000	7,0274	9,5697	9,9714	9,9714	9,9714	9,9714	9,9714	9,9714
2500	8,0097	9,9646	9,9646	9,9646	9,9646	9,9646	9,9646	9,9646	2500	7,2444	9,972	9,972	9,972	9,972	9,972	9,972	9,972
5000	8,0885	9,9515	9,9515	9,9515	9,9515	9,9515	9,9515	9,9515	5000	7,6431	9,9728	9,9728	9,9728	9,9728	9,9728	9,9728	9,9728

Dosis Kelor (mg/L)	Waktu ke-								Slope	Intercept	SRF (m/kg)	Dosis Kelor (mg/L)	Waktu ke-								Slope	Intercept	SRF (m/kg)
	15	30	45	60	90	120	150	180					15	30	45	60	90	120	150	180			
	t/V												t/V										
	t/V												t/V										
0	2,553	3,647	5,391	7,032	10,210	12,032	15,040	18,048	3,442	-20,750	0,034	0	2,553	3,647	5,391	7,032	10,210	12,032	15,040	18,048	3,442	-20,750	0,034
100	2,581	3,962	5,158	6,503	9,022	12,030	15,037	18,045	2,856	-16,389	0,029	100	2,345	3,431	4,993	6,356	9,024	12,032	15,041	18,049	3,350	-21,859	0,033
250	2,391	3,818	4,948	6,015	9,022	12,030	15,037	18,045	2,878	-17,389	0,029	250	2,276	3,656	4,826	6,016	9,024	12,032	15,040	18,048	3,163	-20,393	0,032
500	2,300	3,671	4,849	6,015	9,023	12,031	15,038	18,046	3,104	-19,779	0,031	500	2,157	3,509	4,512	6,016	9,025	12,033	15,041	18,049	3,178	-21,133	0,032
750	2,193	3,339	4,513	6,017	9,025	12,034	15,042	18,051	2,999	-19,584	0,030	750	2,142	3,262	4,513	6,017	9,026	12,034	15,043	18,051	3,120	-20,888	0,031
1000	2,092	3,358	4,513	6,018	9,027	12,036	15,045	18,054	3,435	-23,827	0,034	1000	2,135	3,135	4,513	6,017	9,026	12,034	15,043	18,052	2,923	-19,175	0,029
2500	1,873	3,011	4,516	6,021	9,032	12,043	15,053	18,064	3,992	-30,104	0,040	2500	2,071	3,008	4,513	6,017	9,025	12,034	15,042	18,051	2,786	-18,113	0,028
5000	1,854	3,015	4,522	6,029	9,044	12,058	15,073	18,088	4,206	-32,164	0,042	5000	1,963	3,008	4,512	6,016	9,025	12,033	15,041	18,049	3,308	-23,321	0,033

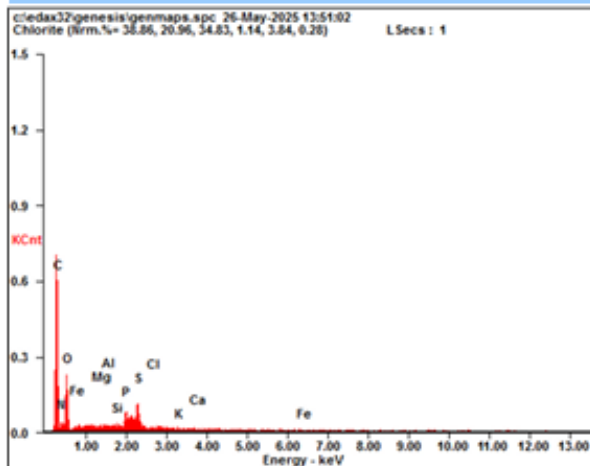
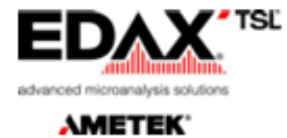
- Hasil Uji SEM-EDX

Microanalysis Report

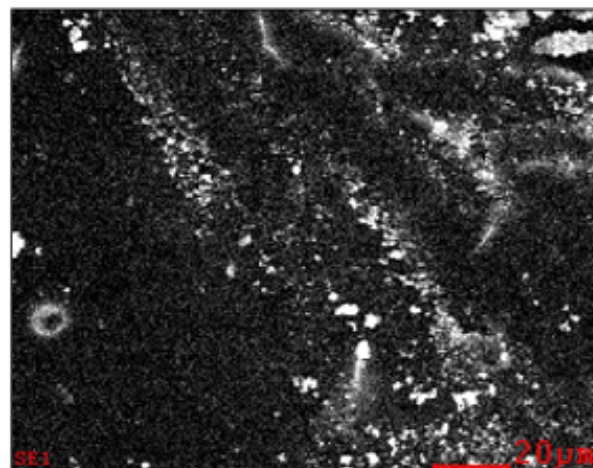
Prepared for: *Company Name Here*

Prepared by: *Your Name Here*

5/26/2025



Element	Wt%	At%
CK	45.12	54.47
NK	12.43	12.87
OK	29.52	26.76
MgK	01.02	00.61
AlK	00.93	00.50
SiK	01.06	00.55
PK	02.79	01.31
SK	04.38	01.98
ClK	00.59	00.24
KK	00.75	00.28
CaK	00.77	00.28
FeK	00.64	00.17
Matrix	Correction	ZAF



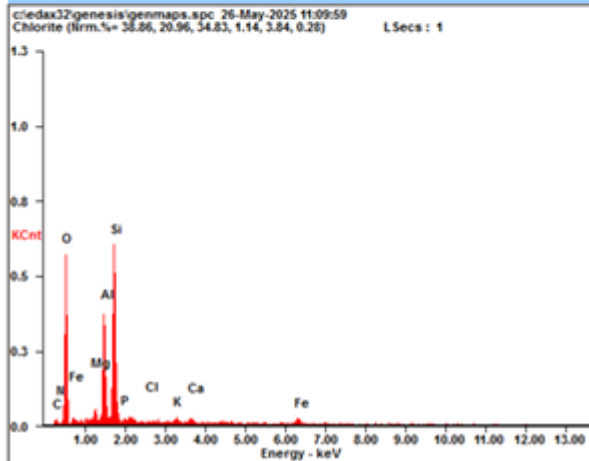
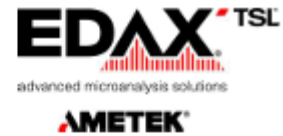
Hasil Uji SEM-EDX Ekstrak Biji Kelor

Microanalysis Report

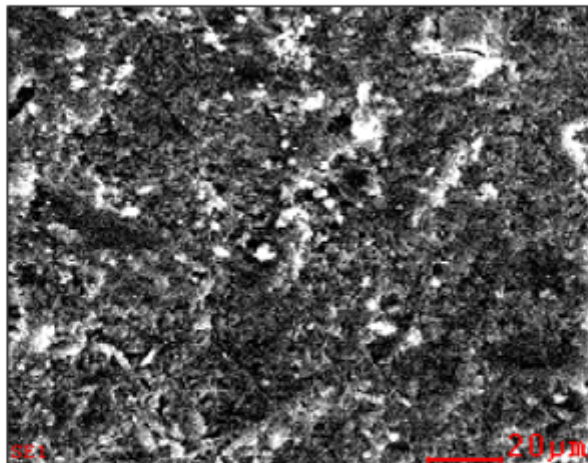
Prepared for: *Company Name Here*

Prepared by: *Your Name Here*

5/26/2025



Element	Wt%	At%
CK	02.73	04.68
NK	01.15	01.69
OK	44.30	56.97
MgK	02.02	01.71
AlK	14.77	11.26
SiK	28.05	20.55
PK	00.60	00.40
ClK	00.15	00.09
KK	01.06	00.56
CaK	01.30	00.67
FeK	03.87	01.43
Matrix	Correction	ZAF



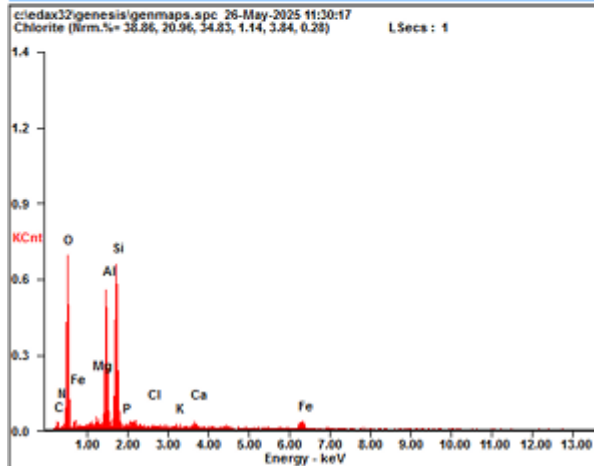
Hasil Uji SEM-EDX Sampel A0(a)

Microanalysis Report

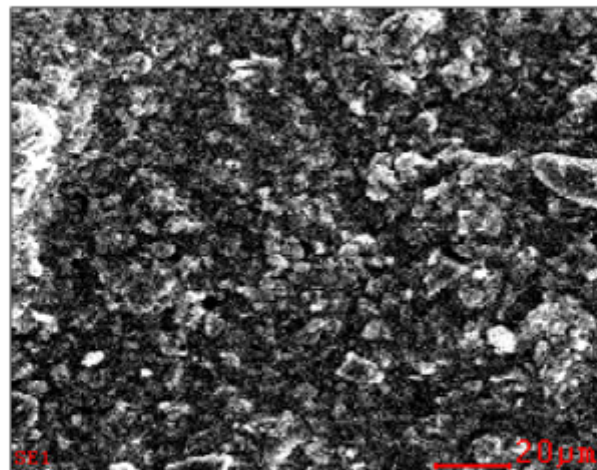
Prepared for: *Company Name Here*

Prepared by: *Your Name Here*

5/26/2025



Element	Wt%	At%
CK	04.25	07.14
NK	01.25	01.80
OK	45.35	57.24
MgK	01.05	00.87
AlK	16.43	12.30
SiK	24.19	17.40
PK	00.71	00.46
ClK	00.16	00.09
KK	00.57	00.29
CaK	01.52	00.77
FeK	04.53	01.64
Matrix	Correction	ZAF



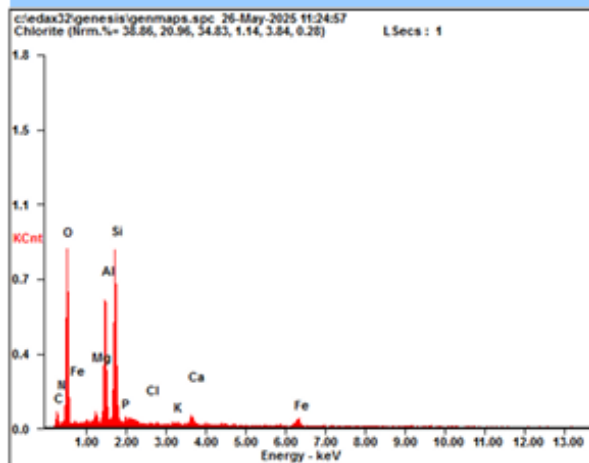
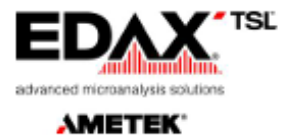
Hasil Uji SEM-EDX Sampel A1(a)

Microanalysis Report

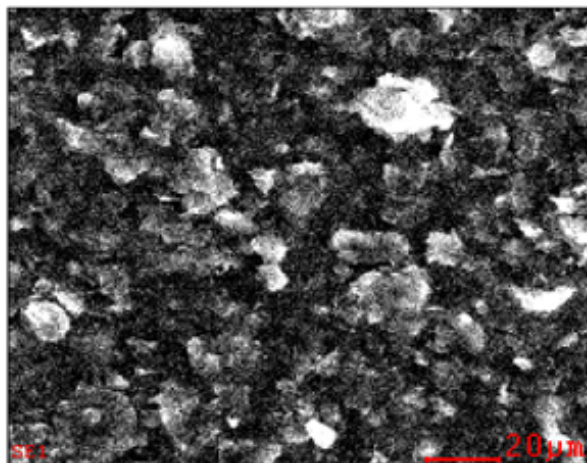
Prepared for: *Company Name Here*

Prepared by: *Your Name Here*

5/26/2025



Element	Wt%	At%
CK	06.81	11.11
NK	02.32	03.25
OK	44.73	54.78
MgK	01.45	01.17
AlK	14.73	10.70
SiK	22.85	15.94
PK	00.75	00.47
ClK	00.08	00.05
KK	00.42	00.21
CaK	02.01	00.98
FeK	03.85	01.35
Matrix	Correction	ZAF



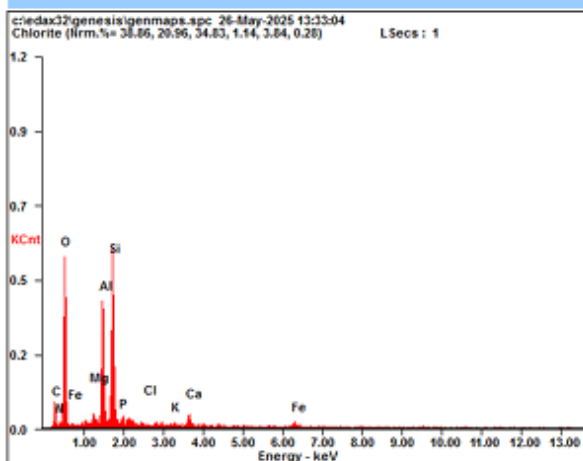
Hasil Uji SEM-EDX Sampel A0(p)

Microanalysis Report

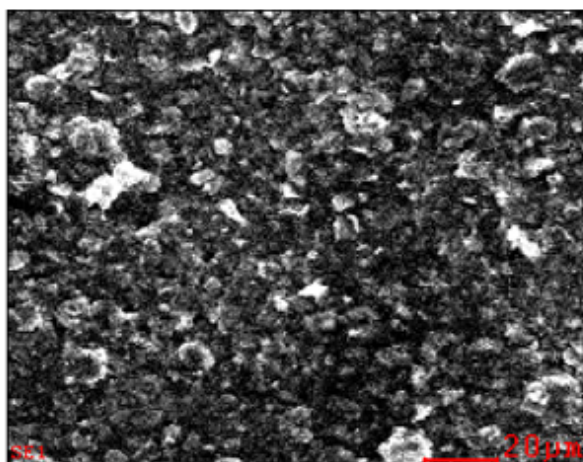
Prepared for: *Company Name Here*

Prepared by: *Your Name Here*

5/26/2025

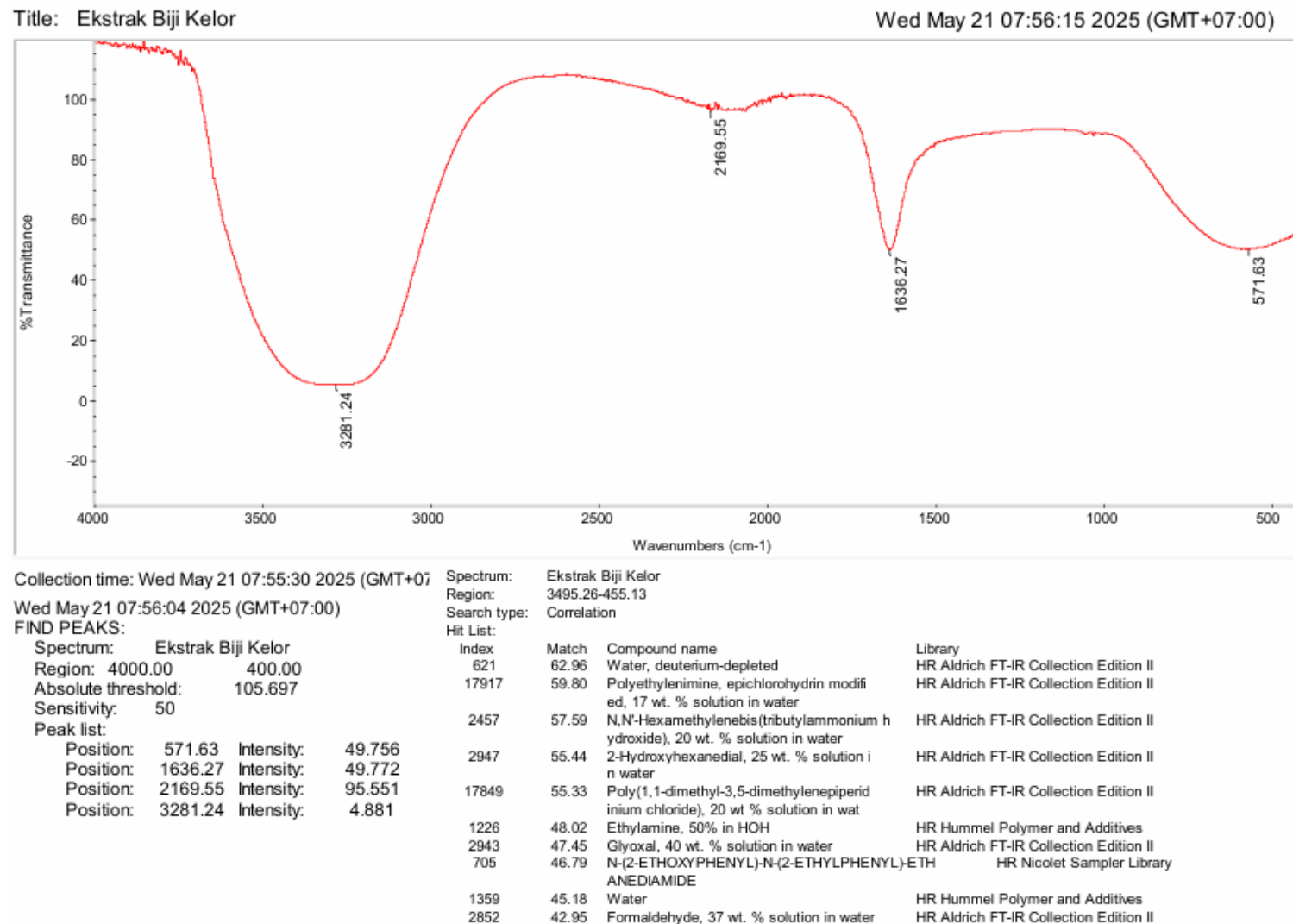


Element	Wt%	At%
CK	08.87	14.09
NK	02.80	03.82
OK	45.10	53.79
MgK	01.30	01.02
AlK	13.77	09.74
SiK	21.70	14.74
PK	00.86	00.53
ClK	00.07	00.04
KK	00.59	00.29
CaK	01.91	00.91
FeK	03.03	01.03
Matrix	Correction	ZAF



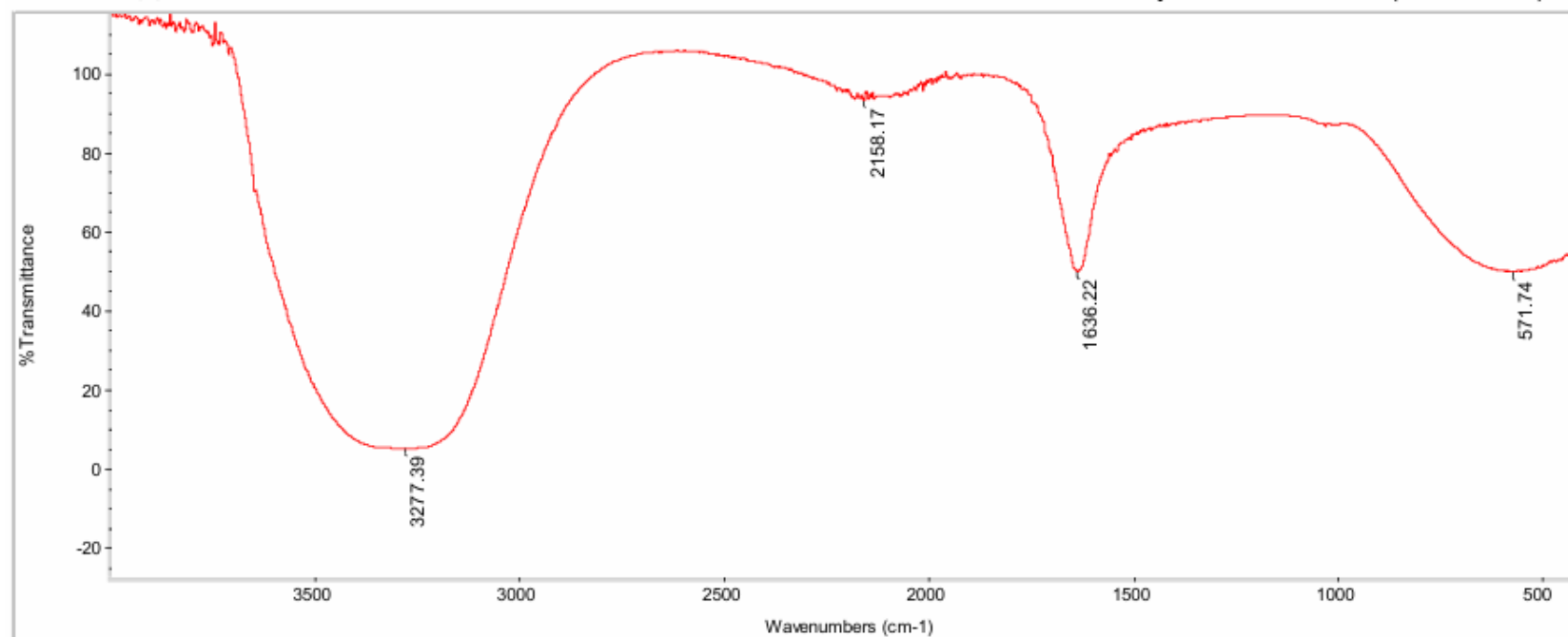
Hasil Uji SEM-EDX Sampel A2(p)

- Hasil Uji FTIR



Title: AO (a)

Wed May 21 07:58:17 2025 (GMT+07:00)



Collection time: Wed May 21 07:57:26 2025 (GMT+07:00)

Wed May 21 07:58:05 2025 (GMT+07:00)

FIND PEAKS:

Spectrum: AO (a)

Region: 4000.00 400.00

Absolute threshold: 95.622

Sensitivity: 50

Peak list:

Position	Intensity
571.74	49.370
1636.22	49.400
2158.17	92.947
3277.39	4.670

Spectrum:

AO (a)

Region: 3495.26-455.13

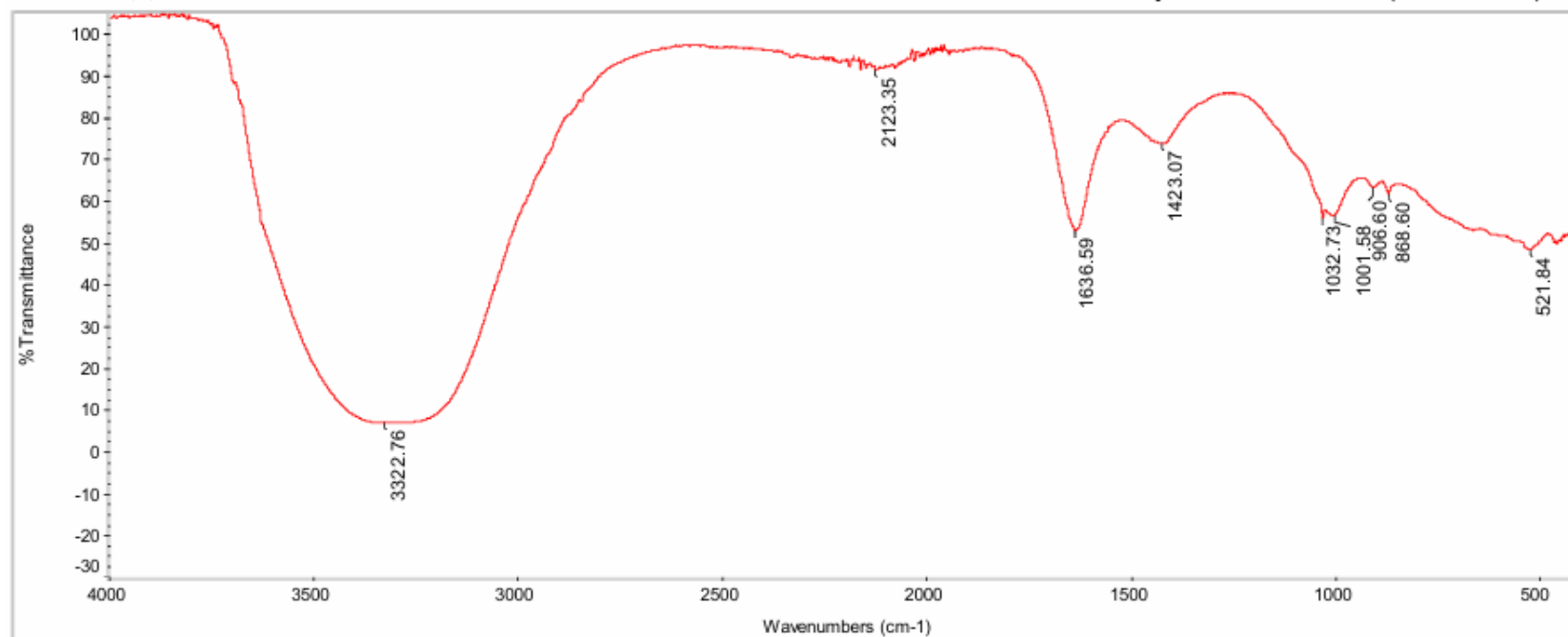
Search type: Correlation

Hit List:

Index	Match	Compound name	Library
621	62.17	Water, deuterium-depleted	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
17917	59.19	Polyethylenimine, epichlorohydrin modified, 17 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
2457	56.97	N,N'-Hexamethylenebis(tributylammonium hydroxide), 20 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
2947	55.05	2-Hydroxyhexanedial, 25 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
17849	54.74	Poly(1,1-dimethyl-3,5-dimethylenepiperidinium chloride), 20 wt % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
1226	48.09	Ethylamine, 50% in HOH	HR Hummel Polymer and Additives
2943	46.94	Glyoxal, 40 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
705	46.53	N-(2-ETHOXYPHENYL)-N-(2-ETHYLPHENYL)-ETHANEDIAMIDE	HR Nicolet Sampler Library
1359	44.34	Water	HR Hummel Polymer and Additives
2852	42.69	Formaldehyde, 37 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II

Title: B4 (a)

Wed May 21 07:49:59 2025 (GMT+07:00)



Collection time: Wed May 21 07:48:42 2025 (GMT+07:00)

Wed May 21 07:49:29 2025 (GMT+07:00)

FIND PEAKS:

Spectrum: B4 (a)

Region: 4000.00 400.00

Absolute threshold: 97.642

Sensitivity: 50

Peak list:

Position	Intensity
521.84	48.134
1032.73	55.608
1423.07	73.502
1636.59	52.622
2123.35	91.172
3322.76	6.465

Spectrum:

B4 (a)

Region: 3495.26-455.13

Search type:

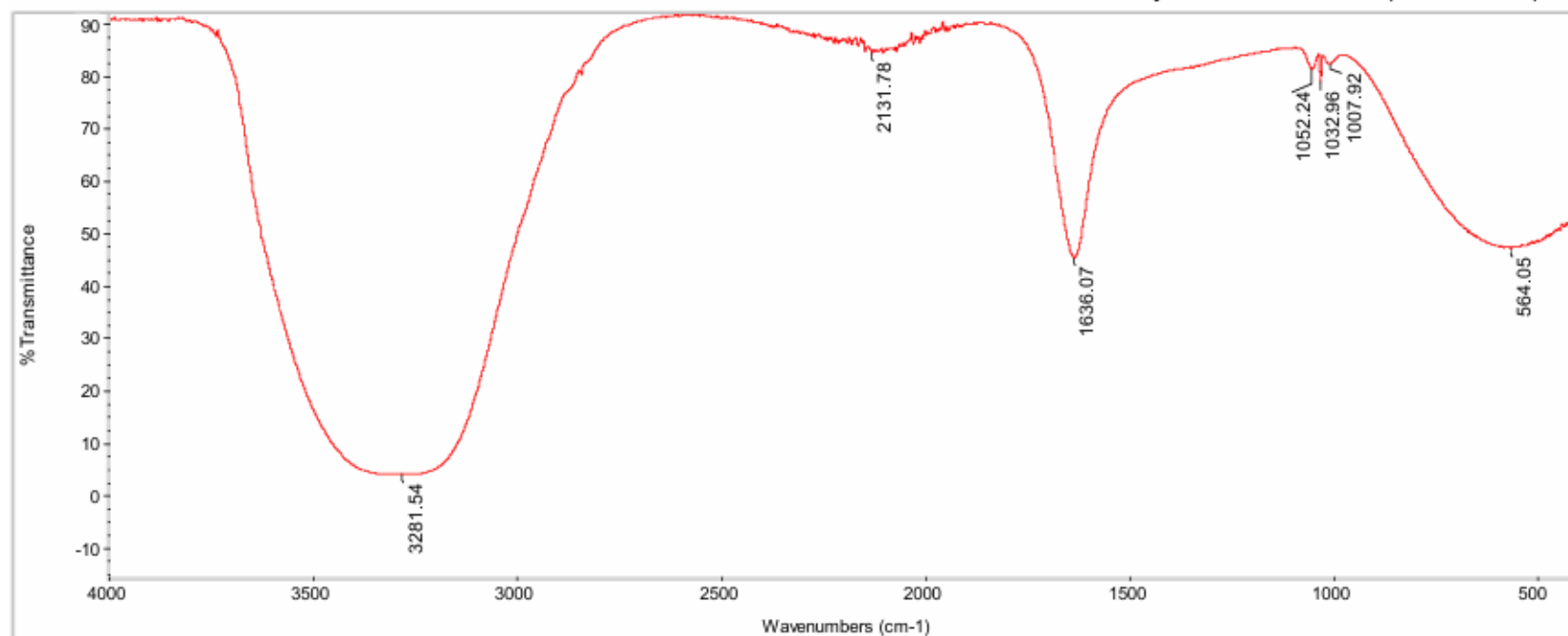
Correlation

Hit List:

Index	Match	Compound name	Library
17917	59.91	Polyethylenimine, epichlorohydrin modified, 17 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
621	58.94	Water, deuterium-depleted	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
2457	55.68	N,N'-Hexamethylenabis(tributylammonium hydroxide), 20 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
2947	54.55	2-Hydroxyhexanedial, 25 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
17849	52.84	Poly(1,1-dimethyl-3,5-dimethylenepiperidinium chloride), 20 wt % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
2852	52.71	Formaldehyde, 37 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
290	51.18	Formaldehyde - aqueous solution	HR Nicolet Sampler Library
2943	49.20	Glyoxal, 40 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
1066	46.84	D-Erythrose, tech., approx 60%	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
705	45.49	N-(2-ETHOXYPHENYL)-N-(2-ETHYLPHENYL)-ETHANEDIAMIDE	HR Nicolet Sampler Library

Title: AO (P)

Wed May 21 07:52:03 2025 (GMT+07:00)



Collection time: Wed May 21 07:51:01 2025 (GMT+07:00)

Wed May 21 07:51:39 2025 (GMT+07:00)

FIND PEAKS:

Spectrum: AO (P)

Region: 4000.00 400.00

Absolute threshold: 85.812

Sensitivity: 50

Peak list:

Position	Intensity
564.05	46.950
1032.96	78.807
1636.07	45.114
2131.78	84.223
3281.54	3.649

Spectrum: AO (P)

Region: 3495.26-455.13

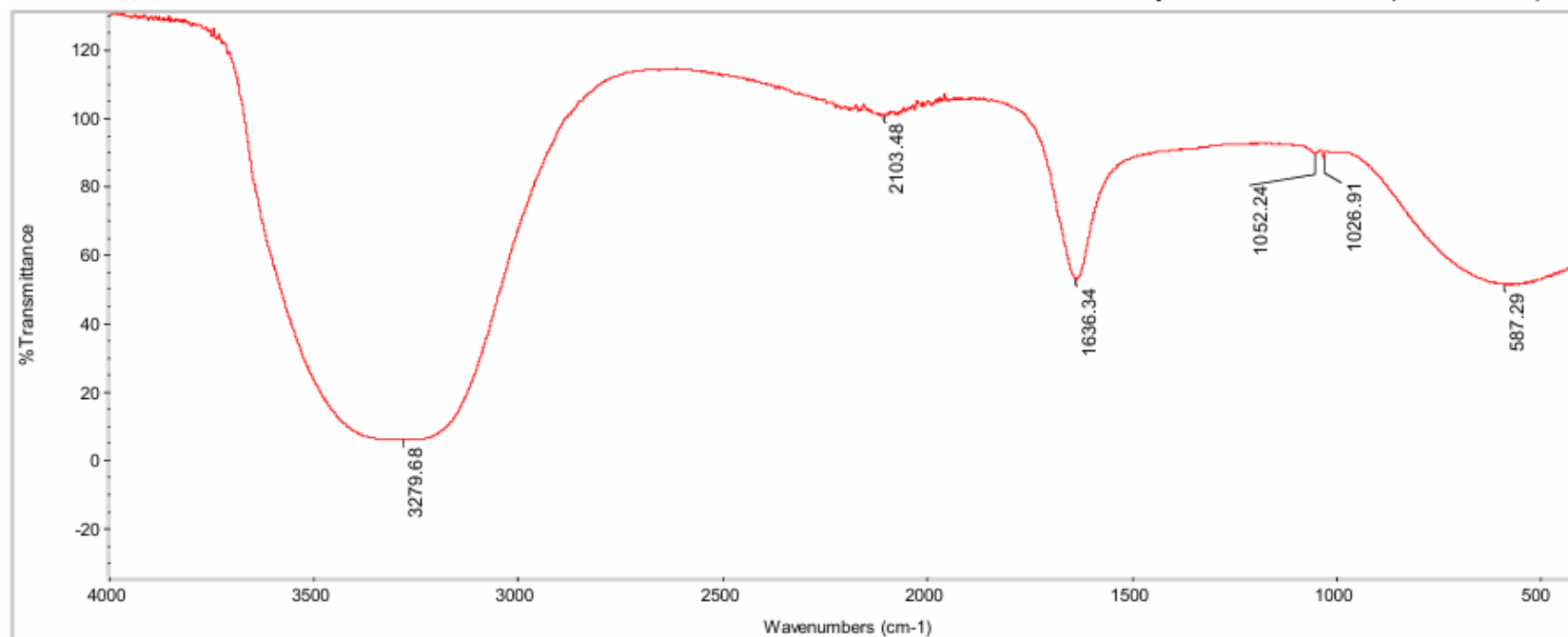
Search type: Correlation

Hit List:

Index	Match	Compound name	Library
621	61.88	Water, deuterium-depleted	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
17917	59.19	Polyethylenimine, epichlorohydrin modified, 17 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
2457	57.18	N,N'-Hexamethylenebis(tributylammonium hydroxide), 20 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
17849	54.56	Poly(1,1-dimethyl-3,5-dimethylenepiperidinium chloride), 20 wt % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
2947	54.50	2-Hydroxyhexanedial, 25 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
1226	47.66	Ethylamine, 50% in HOH	HR Hummel Polymer and Additives
2943	47.36	Glyoxal, 40 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
705	46.35	N-(2-ETHOXYPHENYL)-N-(2-ETHYLPHENYL)-ETHANEDIAMIDE	HR Nicolet Sampler Library
1359	44.06	Water	HR Hummel Polymer and Additives
2852	43.48	Formaldehyde, 37 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II

Title: B5|(P)

Wed May 21 07:54:14 2025 (GMT+07:00)



Collection time: Wed May 21 07:53:23 2025 (GMT+07:00)

Wed May 21 07:53:55 2025 (GMT+07:00)

FIND PEAKS:

Spectrum: B5|(P)

Region: 4000.00 400.00

Absolute threshold: 110.380

Sensitivity: 50

Peak list:

Position	Intensity
587.29	50.889
1636.34	52.476
2103.48	100.246
3279.68	5.442

Spectrum:

B5|(P)

Region: 3495.26-455.13

Search type:

Correlation

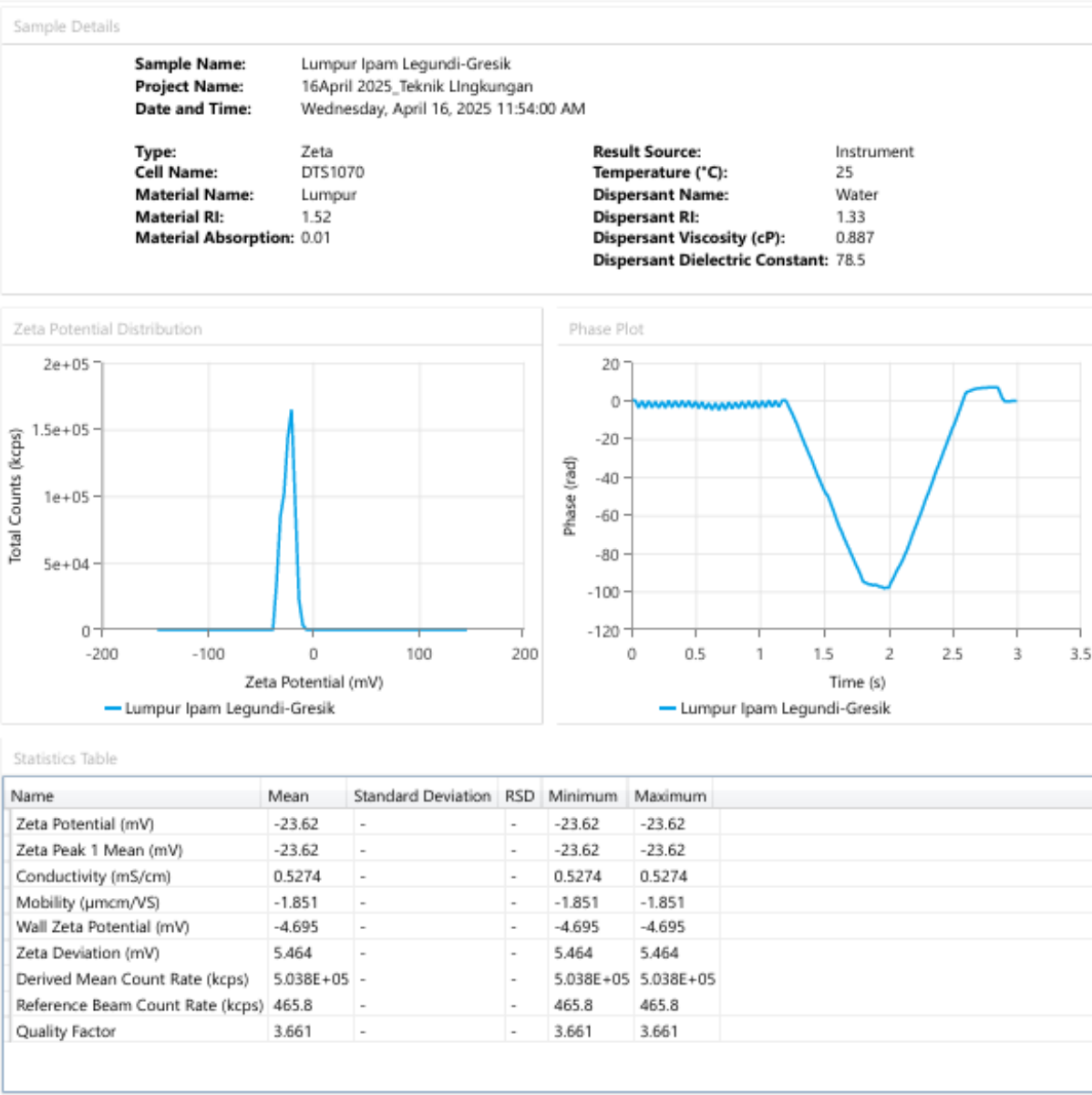
Hit List:

Index	Match	Compound name	Library
621	62.80	Water, deuterium-depleted	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
17917	59.85	Polyethylenimine, epichlorohydrin modified, 17 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
2457	57.24	N,N'-Hexamethylenebis(tributylammonium hydroxide), 20 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
2947	55.05	2-Hydroxyhexanedial, 25 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
17849	54.79	Poly(1,1-dimethyl-3,5-dimethylenepiperidinium chloride), 20 wt % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
1226	48.16	Ethylamine, 50% in HOH	HR Hummel Polymer and Additives
2943	47.47	Glyoxal, 40 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II
705	46.18	N-(2-ETHOXYPHENYL)-N-(2-ETHYLPHENYL)-ETHANEDIAMIDE	HR Nicolet Sampler Library
1359	44.92	Water	HR Hummel Polymer and Additives
2852	42.90	Formaldehyde, 37 wt. % solution in water	HR Aldrich FT-IR Collection Edition II

• Hasil Uji Zeta Potensial

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



Zeta Potential Report

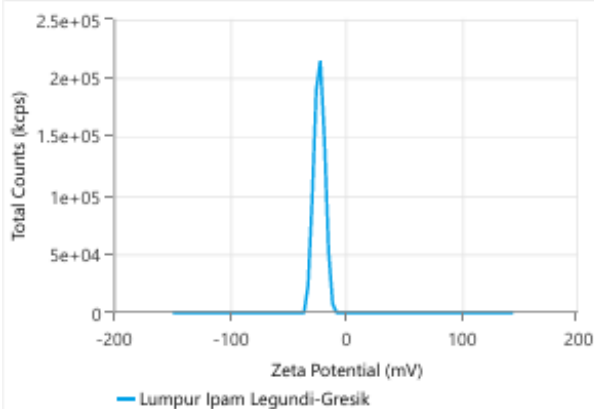
Malvern Panalytical



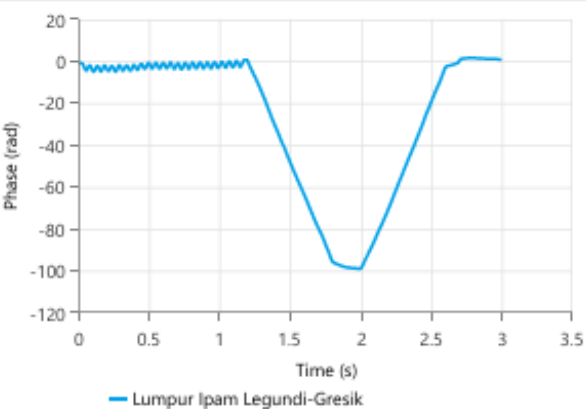
Sample Details

Sample Name:	Lumpur Ipam Legundi-Gresik	Result Source:	Instrument
Project Name:	16April 2025_Teknik Lingkungan	Temperature (°C):	25
Date and Time:	Wednesday, April 16, 2025 11:54:55 AM	Dispersant Name:	Water
Type:	Zeta	Dispersant RI:	1.33
Cell Name:	DTS1070	Dispersant Viscosity (cP):	0.887
Material Name:	Lumpur	Dispersant Dielectric Constant:	78.5
Material RI:	1.52		
Material Absorption:	0.01		

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-22.77	-	-	-22.77	-22.77
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-22.77	-	-	-22.77	-22.77
Conductivity (mS/cm)	0.5274	-	-	0.5274	0.5274
Mobility (µmcm/Vs)	-1.784	-	-	-1.784	-1.784
Wall Zeta Potential (mV)	-3.756	-	-	-3.756	-3.756
Zeta Deviation (mV)	4.467	-	-	4.467	4.467
Derived Mean Count Rate (kcps)	5.038E+05	-	-	5.038E+05	5.038E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	465.8	-	-	465.8	465.8
Quality Factor	4.264	-	-	4.264	4.264



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
Page 1 of 2

ZS XPLORER

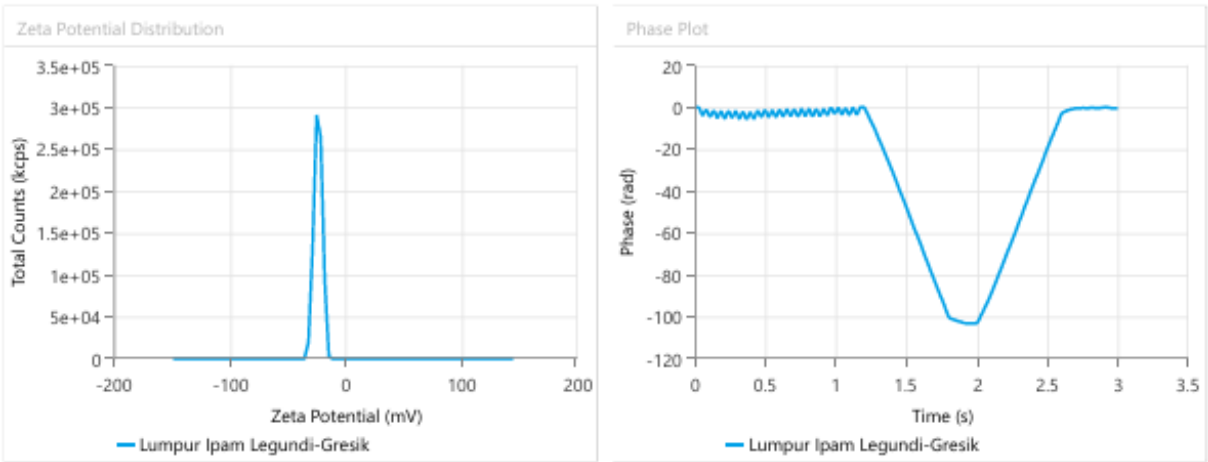
Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/9/2025 7:45 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



Sample Details			
Sample Name:	Lumpur Ipam Legundi-Gresik		
Project Name:	16April 2025_Teknik Lingkungan		
Date and Time:	Wednesday, April 16, 2025 11:55:49 AM		
Type:	Zeta	Result Source:	Instrument
Cell Name:	DTS1070	Temperature (°C):	25
Material Name:	Lumpur	Dispersant Name:	Water
Material RI:	1.52	Dispersant RI:	1.33
Material Absorption:	0.01	Dispersant Viscosity (cP):	0.887
		Dispersant Dielectric Constant:	78.5



Statistics Table						
Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum	
Zeta Potential (mV)	-23.68	-	-	-23.68	-23.68	
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-23.68	-	-	-23.68	-23.68	
Conductivity (mS/cm)	0.5274	-	-	0.5274	0.5274	
Mobility (µmcm/Vs)	-1.855	-	-	-1.855	-1.855	
Wall Zeta Potential (mV)	-4.287	-	-	-4.287	-4.287	
Zeta Deviation (mV)	3.454	-	-	3.454	3.454	
Derived Mean Count Rate (kcps)	5.038E+05	-	-	5.038E+05	5.038E+05	
Reference Beam Count Rate (kcps)	465.8	-	-	465.8	465.8	
Quality Factor	6.045	-	-	6.045	6.045	

Zeta Potential Report

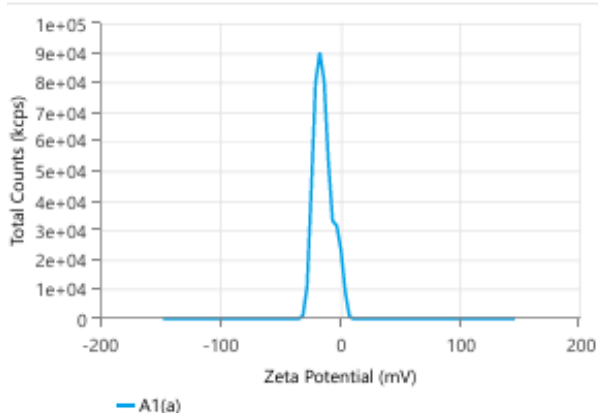
Malvern Panalytical



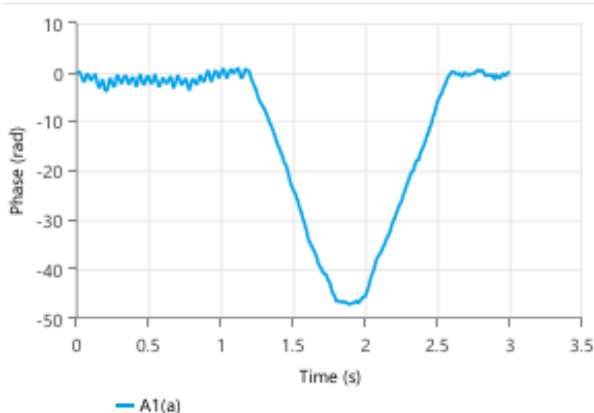
Sample Details

Sample Name:	A1(a)	Result Source:	Instrument
Project Name:	23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI	Temperature (°C):	25
Date and Time:	Friday, May 23, 2025 7:44:33 AM	Dispersant Name:	Water
Type:	Zeta	Dispersant RI:	1.33
Cell Name:	DTS1070	Dispersant Viscosity (cP):	0.887
Material Name:	Lumpur	Dispersant Dielectric Constant:	78.5
Material RI:	1.52		
Material Absorption:	0.01		

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-13.97	-	-	-13.97	-13.97
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-13.97	-	-	-13.97	-13.97
Conductivity (mS/cm)	0.5343	-	-	0.5343	0.5343
Mobility (µmcm/Vs)	-1.094	-	-	-1.094	-1.094
Wall Zeta Potential (mV)	1.079	-	-	1.079	1.079
Zeta Deviation (mV)	7.529	-	-	7.529	7.529
Derived Mean Count Rate (kcps)	1.555E+05	-	-	1.555E+05	1.555E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	507.6	-	-	507.6	507.6
Quality Factor	1.265	-	-	1.265	1.265



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
Page 1 of 2

ZS XPLOER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:19 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



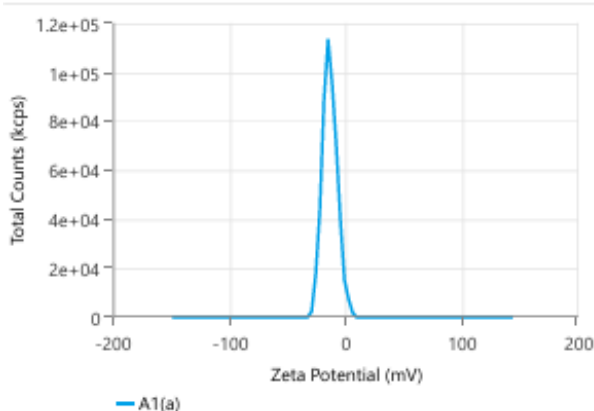
Sample Details

Sample Name: A1(a)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 7:45:40 AM

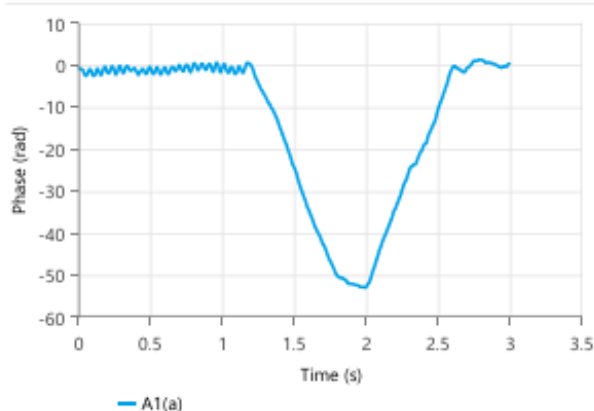
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-13.46	-	-	-13.46	-13.46
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-13.46	-	-	-13.46	-13.46
Conductivity (mS/cm)	0.5343	-	-	0.5343	0.5343
Mobility (µmcm/Vs)	-1.055	-	-	-1.055	-1.055
Wall Zeta Potential (mV)	-0.6108	-	-	-0.6108	-0.6108
Zeta Deviation (mV)	6.326	-	-	6.326	6.326
Derived Mean Count Rate (kcps)	1.555E+05	-	-	1.555E+05	1.555E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	507.6	-	-	507.6	507.6
Quality Factor	1.581	-	-	1.581	1.581



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:20 AM

Zeta Potential Report

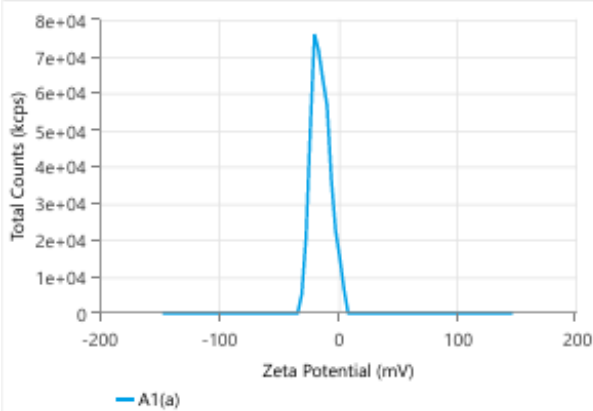
Malvern Panalytical



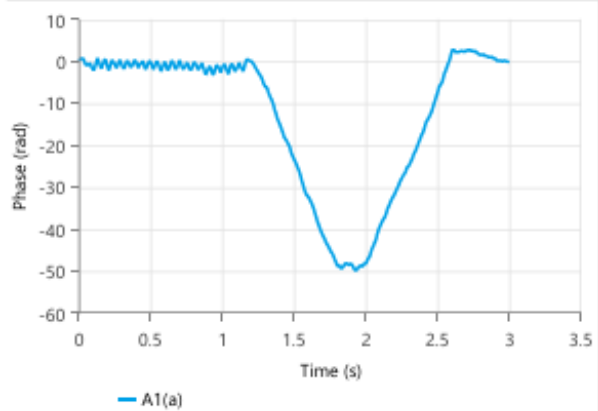
Sample Details

Sample Name:	A1(a)	Result Source:	Instrument
Project Name:	23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI	Temperature (°C):	25
Date and Time:	Friday, May 23, 2025 7:46:53 AM	Dispersant Name:	Water
Type:	Zeta	Dispersant RI:	1.33
Cell Name:	DTS1070	Dispersant Viscosity (cP):	0.887
Material Name:	Lumpur	Dispersant Dielectric Constant:	78.5
Material RI:	1.52		
Material Absorption:	0.01		

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-14.28	-	-	-14.28	-14.28
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-14.28	-	-	-14.28	-14.28
Conductivity (mS/cm)	0.5343	-	-	0.5343	0.5343
Mobility (µmcm/Vs)	-1.119	-	-	-1.119	-1.119
Wall Zeta Potential (mV)	-0.2027	-	-	-0.2027	-0.2027
Zeta Deviation (mV)	7.7	-	-	7.7	7.7
Derived Mean Count Rate (kcps)	1.555E+05	-	-	1.555E+05	1.555E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	507.6	-	-	507.6	507.6
Quality Factor	2.378	-	-	2.378	2.378



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
Page 1 of 2

ZS XPLOER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:21 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



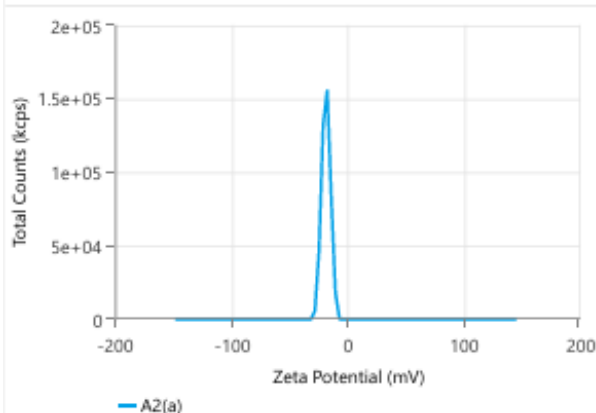
Sample Details

Sample Name: A2(a)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 7:57:34 AM

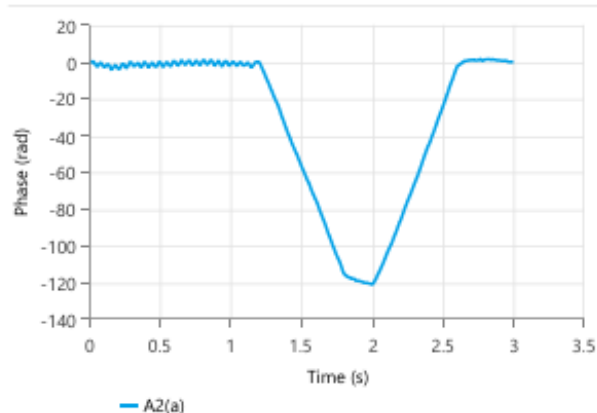
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-18.56	-	-	-18.56	-18.56
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-18.56	-	-	-18.56	-18.56
Conductivity (mS/cm)	0.5524	-	-	0.5524	0.5524
Mobility (µmcm/Vs)	-1.454	-	-	-1.454	-1.454
Wall Zeta Potential (mV)	-15.69	-	-	-15.69	-15.69
Zeta Deviation (mV)	3.733	-	-	3.733	3.733
Derived Mean Count Rate (kcps)	2.391E+05	-	-	2.391E+05	2.391E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	484.7	-	-	484.7	484.7
Quality Factor	2.103	-	-	2.103	2.103



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
Page 1 of 2

ZS XPLOER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:22 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



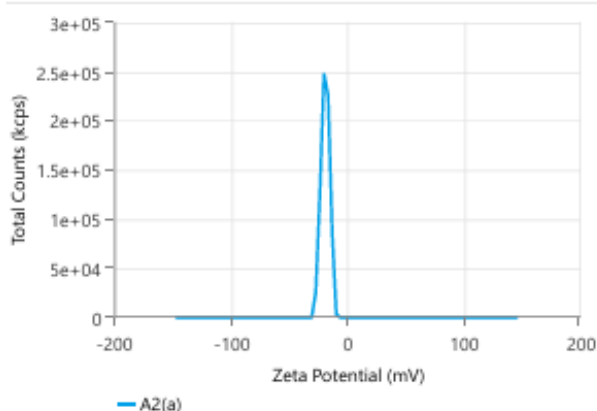
Sample Details

Sample Name: A2(a)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 7:58:29 AM

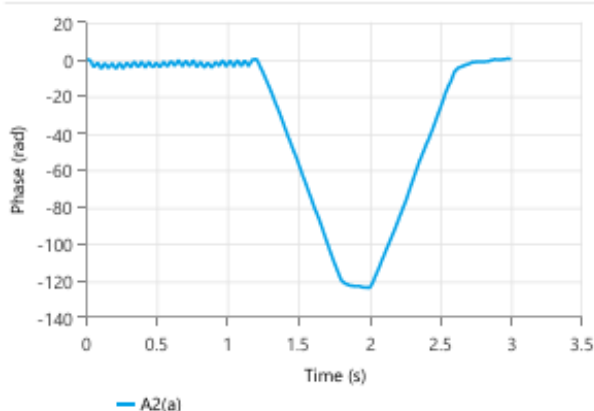
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25.01
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-18.97	-	-	-18.97	-18.97
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-18.97	-	-	-18.97	-18.97
Conductivity (mS/cm)	0.5524	-	-	0.5524	0.5524
Mobility (µmcm/Vs)	-1.486	-	-	-1.486	-1.486
Wall Zeta Potential (mV)	-14.91	-	-	-14.91	-14.91
Zeta Deviation (mV)	3.631	-	-	3.631	3.631
Derived Mean Count Rate (kcps)	2.391E+05	-	-	2.391E+05	2.391E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	484.7	-	-	484.7	484.7
Quality Factor	2.048	-	-	2.048	2.048



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
 Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
 Printed: 5/23/2025 11:22 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



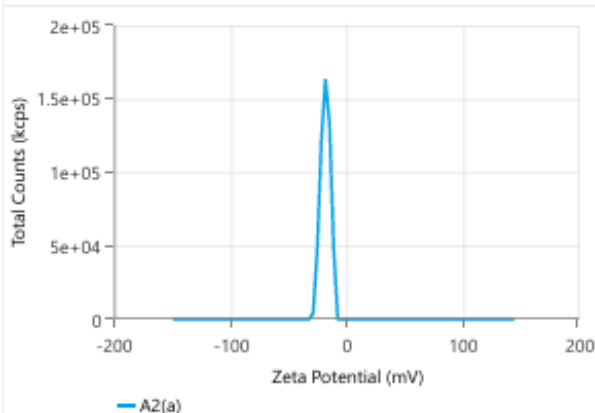
Sample Details

Sample Name: A2(a)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 7:59:24 AM

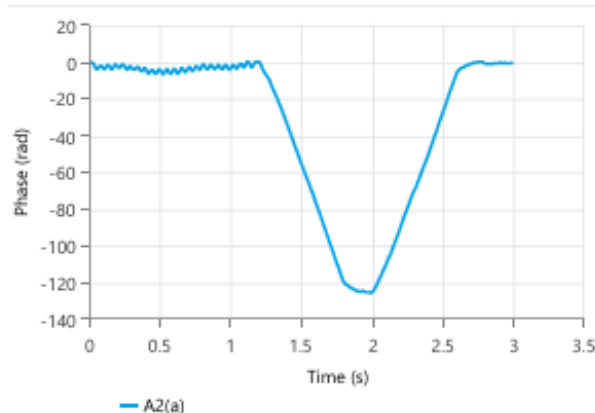
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-18.21	-	-	-18.21	-18.21
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-18.21	-	-	-18.21	-18.21
Conductivity (mS/cm)	0.5524	-	-	0.5524	0.5524
Mobility (µmcm/Vs)	-1.427	-	-	-1.427	-1.427
Wall Zeta Potential (mV)	-17.27	-	-	-17.27	-17.27
Zeta Deviation (mV)	4.032	-	-	4.032	4.032
Derived Mean Count Rate (kcps)	2.391E+05	-	-	2.391E+05	2.391E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	484.7	-	-	484.7	484.7
Quality Factor	1.791	-	-	1.791	1.791



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
 Page 1 of 2

ZS XPLOER

Template Created: 5/14/2019
 Printed: 5/23/2025 11:22 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



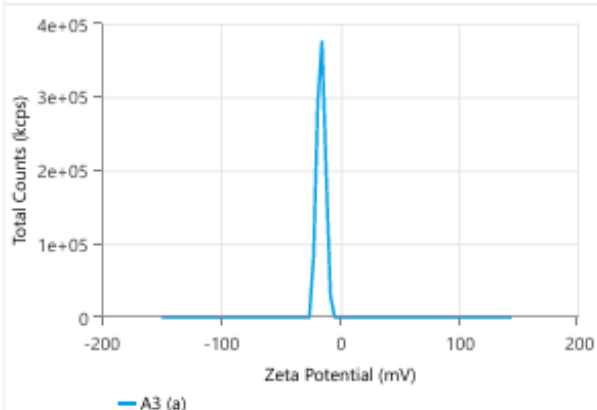
Sample Details

Sample Name: A3 (a)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 8:23:46 AM

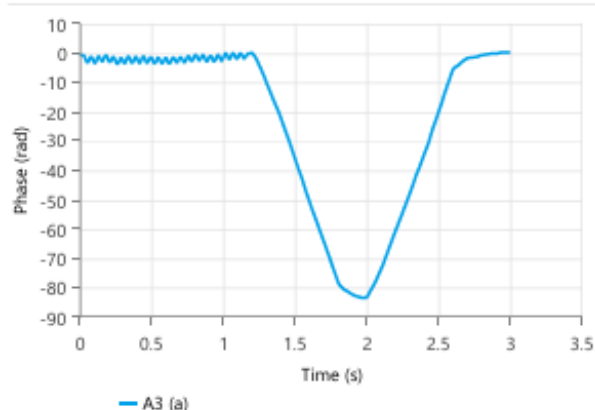
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-15.89	-	-	-15.89	-15.89
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-15.89	-	-	-15.89	-15.89
Conductivity (mS/cm)	0.5225	-	-	0.5225	0.5225
Mobility (µmcm/VS)	-1.245	-	-	-1.245	-1.245
Wall Zeta Potential (mV)	-7.609	-	-	-7.609	-7.609
Zeta Deviation (mV)	3.378	-	-	3.378	3.378
Derived Mean Count Rate (kcps)	6.114E+05	-	-	6.114E+05	6.114E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	497.2	-	-	497.2	497.2
Quality Factor	3.845	-	-	3.845	3.845



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
 Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
 Printed: 5/23/2025 11:23 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



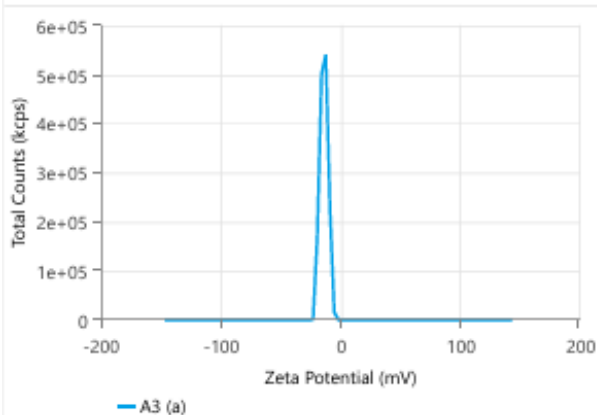
Sample Details

Sample Name: A3 (a)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 8:24:41 AM

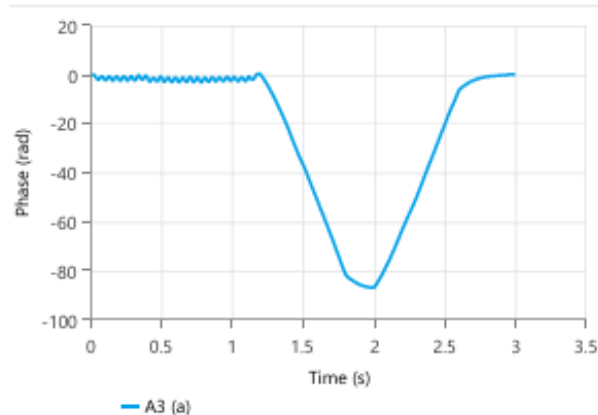
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-13.7	-	-	-13.7	-13.7
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-13.7	-	-	-13.7	-13.7
Conductivity (mS/cm)	0.5225	-	-	0.5225	0.5225
Mobility (µmcm/Vs)	-1.073	-	-	-1.073	-1.073
Wall Zeta Potential (mV)	-10.61	-	-	-10.61	-10.61
Zeta Deviation (mV)	3.272	-	-	3.272	3.272
Derived Mean Count Rate (kcps)	6.114E+05	-	-	6.114E+05	6.114E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	497.2	-	-	497.2	497.2
Quality Factor	3.108	-	-	3.108	3.108



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:23 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



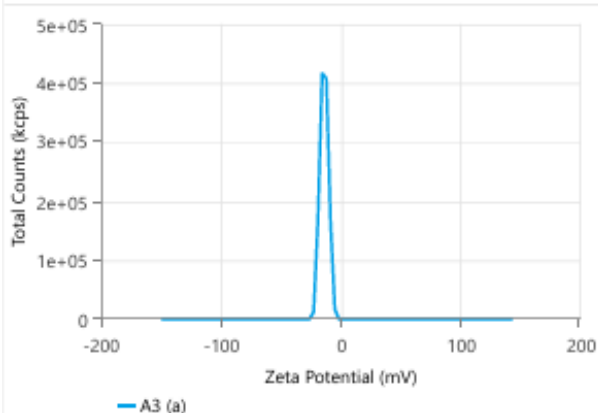
Sample Details

Sample Name: A3 (a)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 8:25:35 AM

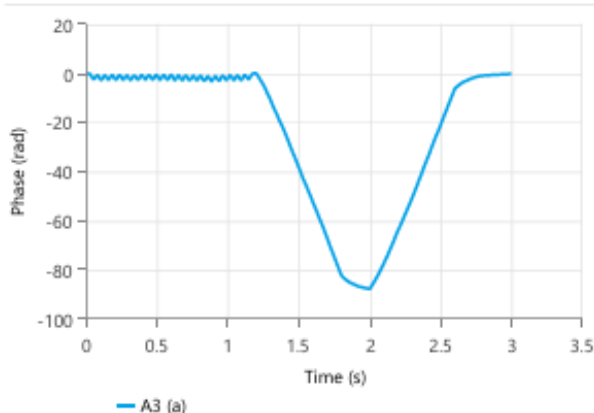
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-13.77	-	-	-13.77	-13.77
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-13.77	-	-	-13.77	-13.77
Conductivity (mS/cm)	0.5225	-	-	0.5225	0.5225
Mobility (µmcm/Vs)	-1.079	-	-	-1.079	-1.079
Wall Zeta Potential (mV)	-10.04	-	-	-10.04	-10.04
Zeta Deviation (mV)	3.453	-	-	3.453	3.453
Derived Mean Count Rate (kcps)	6.114E+05	-	-	6.114E+05	6.114E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	497.2	-	-	497.2	497.2
Quality Factor	4.384	-	-	4.384	4.384



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
 Page 1 of 2

ZS XPLOER

Template Created: 5/14/2019
 Printed: 5/23/2025 11:23 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



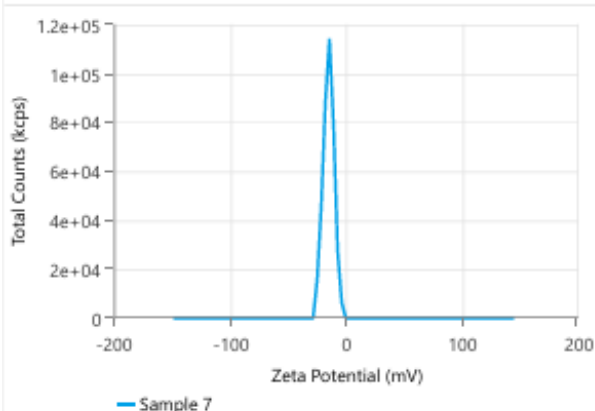
Sample Details

Sample Name: Sample 7
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 8:35:32 AM

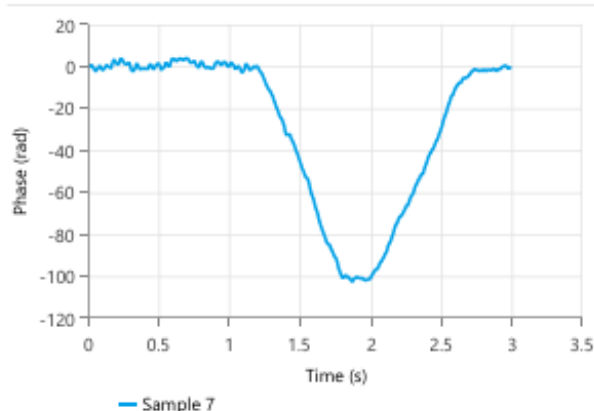
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25.01
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-15	-	-	-15	-15
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-15	-	-	-15	-15
Conductivity (mS/cm)	0.477	-	-	0.477	0.477
Mobility (µmcm/Vs)	-1.175	-	-	-1.175	-1.175
Wall Zeta Potential (mV)	-14.43	-	-	-14.43	-14.43
Zeta Deviation (mV)	4.619	-	-	4.619	4.619
Derived Mean Count Rate (kcps)	1.264E+05	-	-	1.264E+05	1.264E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	550.3	-	-	550.3	550.3
Quality Factor	1.009	-	-	1.009	1.009



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
 Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
 Printed: 5/23/2025 11:25 AM

Zeta Potential Report

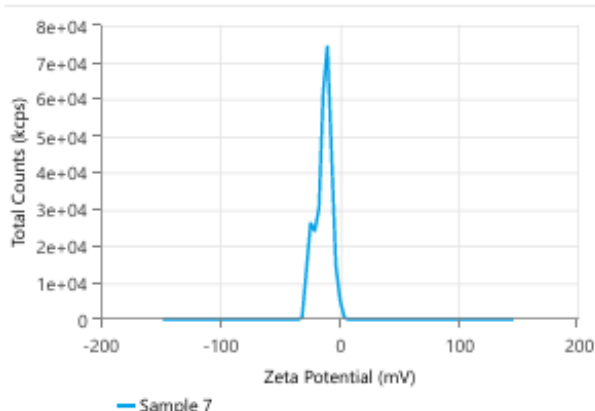
Malvern Panalytical



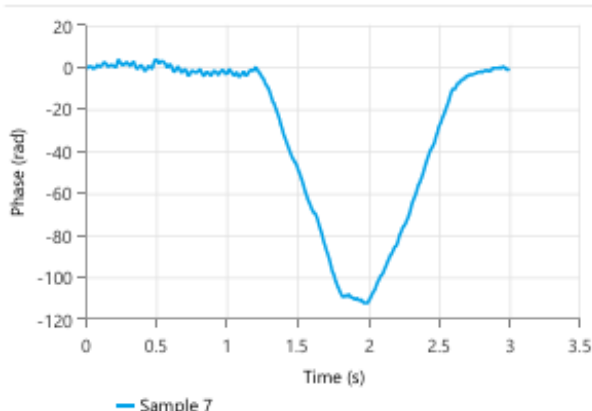
Sample Details

Sample Name:	Sample 7	Result Source:	Instrument
Project Name:	23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI	Temperature (°C):	25
Date and Time:	Friday, May 23, 2025 8:36:39 AM	Dispersant Name:	Water
Type:	Zeta	Dispersant RI:	1.33
Cell Name:	DTS1070	Dispersant Viscosity (cP):	0.887
Material Name:	Lumpur	Dispersant Dielectric Constant:	78.5
Material RI:	1.52		
Material Absorption:	0.01		

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-13.45	-	-	-13.45	-13.45
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-23.72	-	-	-23.72	-23.72
Zeta Peak 2 Mean (mV)	-11.56	-	-	-11.56	-11.56
Conductivity (mS/cm)	0.477	-	-	0.477	0.477
Mobility (µmcm/Vs)	-1.054	-	-	-1.054	-1.054
Wall Zeta Potential (mV)	-17.99	-	-	-17.99	-17.99
Zeta Deviation (mV)	6.704	-	-	6.704	6.704
Derived Mean Count Rate (kcps)	1.264E+05	-	-	1.264E+05	1.264E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	550.3	-	-	550.3	550.3
Quality Factor	1.252	-	-	1.252	1.252



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:25 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



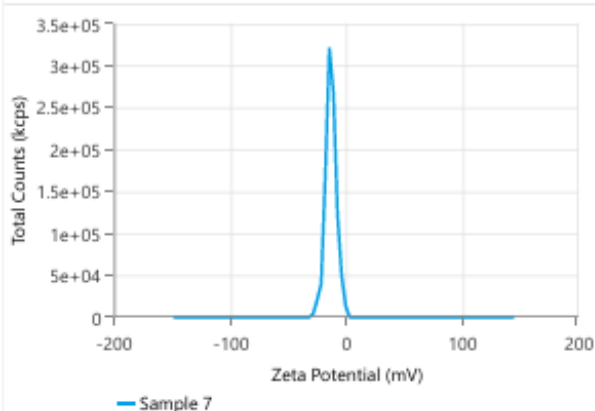
Sample Details

Sample Name: Sample 7
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 8:37:46 AM

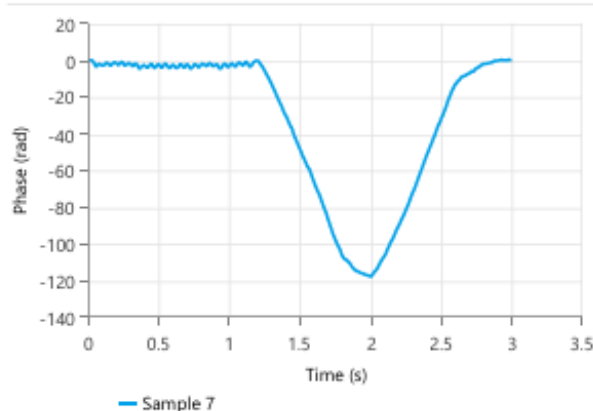
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-13.06	-	-	-13.06	-13.06
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-13.06	-	-	-13.06	-13.06
Conductivity (mS/cm)	0.477	-	-	0.477	0.477
Mobility (µmcm/Vs)	-1.023	-	-	-1.023	-1.023
Wall Zeta Potential (mV)	-18.7	-	-	-18.7	-18.7
Zeta Deviation (mV)	4.766	-	-	4.766	4.766
Derived Mean Count Rate (kcps)	1.264E+05	-	-	1.264E+05	1.264E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	550.3	-	-	550.3	550.3
Quality Factor	1.002	-	-	1.002	1.002



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
 Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
 Printed: 5/23/2025 11:25 AM

Zeta Potential Report

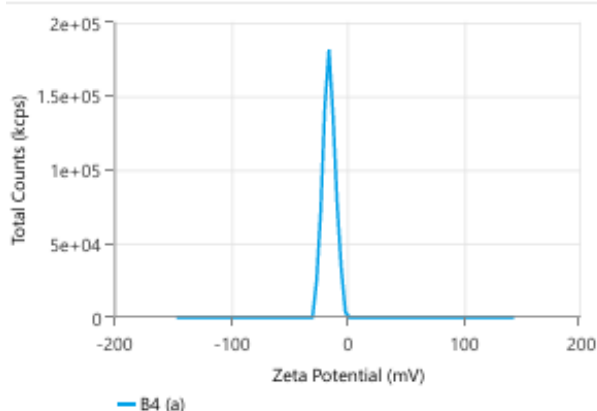
Malvern Panalytical



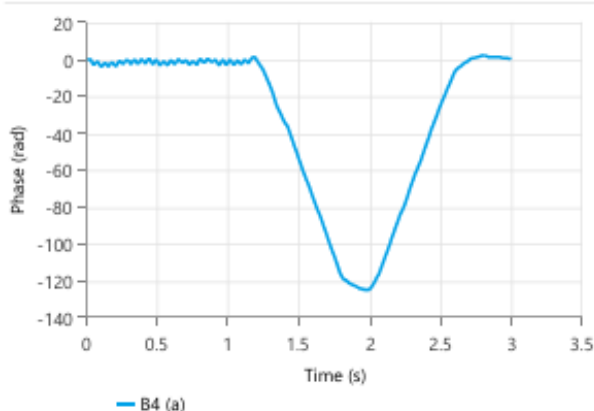
Sample Details

Sample Name:	B4 (a)	Result Source:	Instrument
Project Name:	23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI	Temperature (°C):	25.01
Date and Time:	Friday, May 23, 2025 10:28:14 AM	Dispersant Name:	Water
Type:	Zeta	Dispersant RI:	1.33
Cell Name:	DTS1070	Dispersant Viscosity (cP):	0.887
Material Name:	Lumpur	Dispersant Dielectric Constant:	78.5
Material RI:	1.52		
Material Absorption:	0.01		

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-15.62	-	-	-15.62	-15.62
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-15.62	-	-	-15.62	-15.62
Conductivity (mS/cm)	0.5455	-	-	0.5455	0.5455
Mobility (µmcm/Vs)	-1.224	-	-	-1.224	-1.224
Wall Zeta Potential (mV)	-18.97	-	-	-18.97	-18.97
Zeta Deviation (mV)	5.198	-	-	5.198	5.198
Derived Mean Count Rate (kcps)	9.291E+04	-	-	9.291E+04	9.291E+04
Reference Beam Count Rate (kcps)	558.2	-	-	558.2	558.2
Quality Factor	2.247	-	-	2.247	2.247



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:26 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



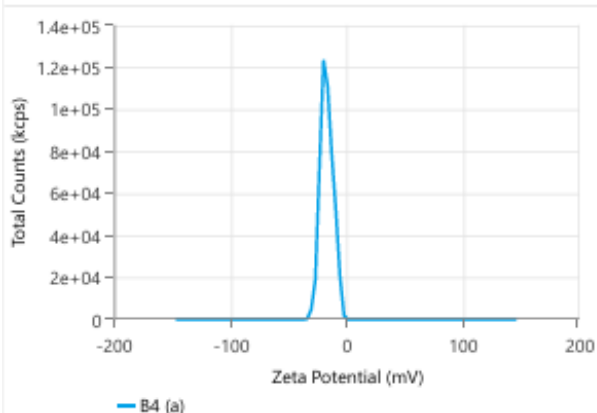
Sample Details

Sample Name: B4 (a)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 10:29:08 AM

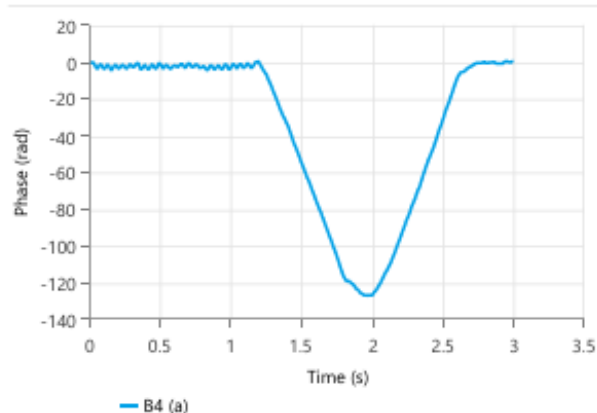
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-17.02	-	-	-17.02	-17.02
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-17.02	-	-	-17.02	-17.02
Conductivity (mS/cm)	0.5455	-	-	0.5455	0.5455
Mobility (µmcm/Vs)	-1.334	-	-	-1.334	-1.334
Wall Zeta Potential (mV)	-17.73	-	-	-17.73	-17.73
Zeta Deviation (mV)	5.441	-	-	5.441	5.441
Derived Mean Count Rate (kcps)	9.291E+04	-	-	9.291E+04	9.291E+04
Reference Beam Count Rate (kcps)	558.2	-	-	558.2	558.2
Quality Factor	1.469	-	-	1.469	1.469



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
Page 1 of 2

ZS XPLOER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:26 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



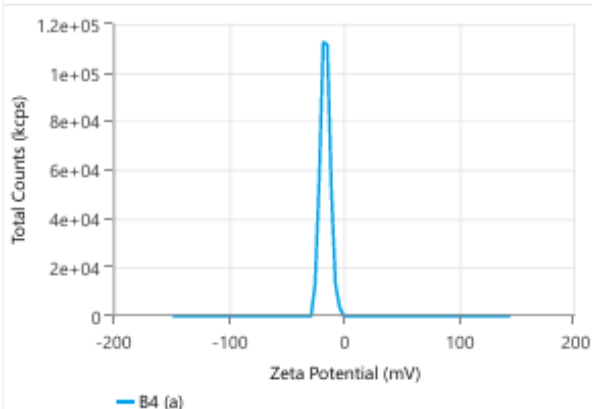
Sample Details

Sample Name: B4 (a)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 10:30:02 AM

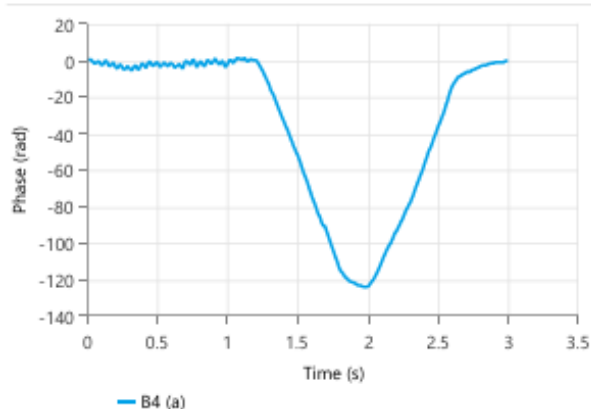
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-16.25	-	-	-16.25	-16.25
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-16.25	-	-	-16.25	-16.25
Conductivity (mS/cm)	0.5455	-	-	0.5455	0.5455
Mobility (μmcm/VS)	-1.273	-	-	-1.273	-1.273
Wall Zeta Potential (mV)	-17.06	-	-	-17.06	-17.06
Zeta Deviation (mV)	4.186	-	-	4.186	4.186
Derived Mean Count Rate (kcps)	9.291E+04	-	-	9.291E+04	9.291E+04
Reference Beam Count Rate (kcps)	558.2	-	-	558.2	558.2
Quality Factor	1.387	-	-	1.387	1.387



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
 Page 1 of 2

ZS XPLOER

Template Created: 5/14/2019
 Printed: 5/23/2025 11:26 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



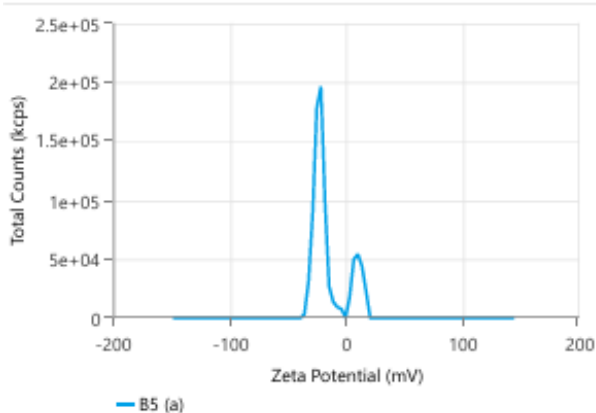
Sample Details

Sample Name: B5 (a)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 10:46:31 AM

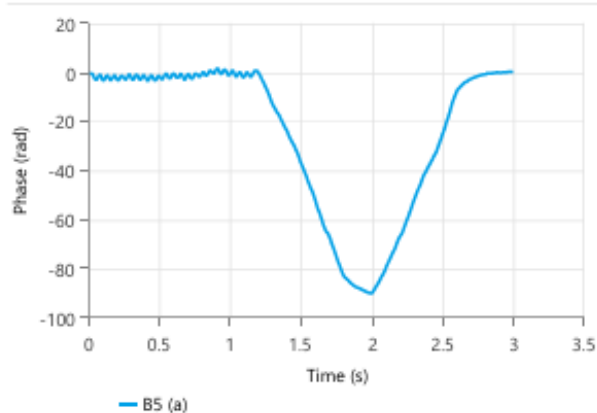
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-15.4	-	-	-15.4	-15.4
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-22.75	-	-	-22.75	-22.75
Zeta Peak 2 Mean (mV)	10.13	-	-	10.13	10.13
Conductivity (mS/cm)	0.6389	-	-	0.6389	0.6389
Mobility (µmcm/Vs)	-1.206	-	-	-1.206	-1.206
Wall Zeta Potential (mV)	-9.221	-	-	-9.221	-9.221
Zeta Deviation (mV)	14.61	-	-	14.61	14.61
Derived Mean Count Rate (kcps)	7951	-	-	7951	7951
Reference Beam Count Rate (kcps)	499.1	-	-	499.1	499.1
Quality Factor	2.775	-	-	2.775	2.775



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
Page 1 of 2

ZS XPLOER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:27 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



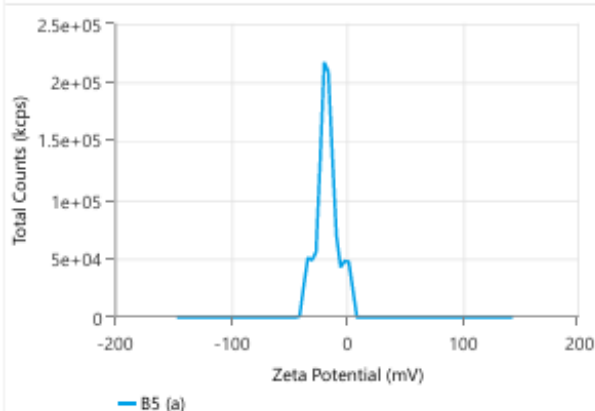
Sample Details

Sample Name: B5 (a)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 10:47:24 AM

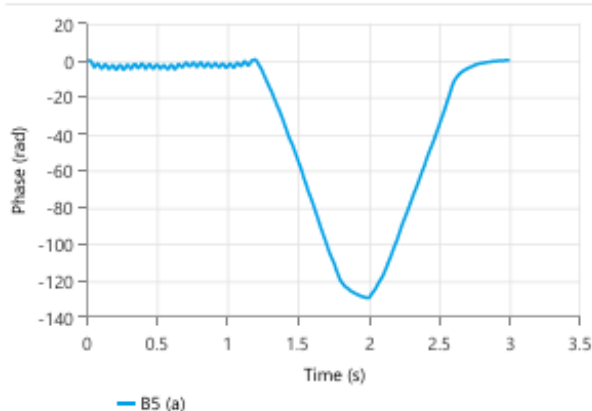
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-16.89	-	-	-16.89	-16.89
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-33.07	-	-	-33.07	-33.07
Zeta Peak 2 Mean (mV)	-17.68	-	-	-17.68	-17.68
Conductivity (mS/cm)	0.6389	-	-	0.6389	0.6389
Mobility (µmcm/VS)	-1.323	-	-	-1.323	-1.323
Wall Zeta Potential (mV)	-18.4	-	-	-18.4	-18.4
Zeta Deviation (mV)	9.391	-	-	9.391	9.391
Derived Mean Count Rate (kcps)	7951	-	-	7951	7951
Reference Beam Count Rate (kcps)	499.1	-	-	499.1	499.1
Quality Factor	2.436	-	-	2.436	2.436



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
 Page 1 of 2

ZS XPLOER

Template Created: 5/14/2019
 Printed: 5/23/2025 11:27 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



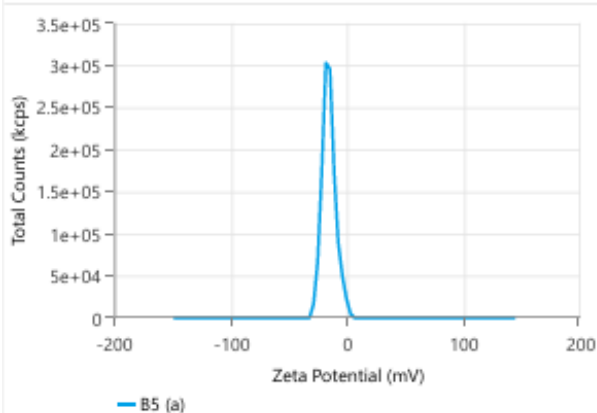
Sample Details

Sample Name: B5 (a)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 10:48:18 AM

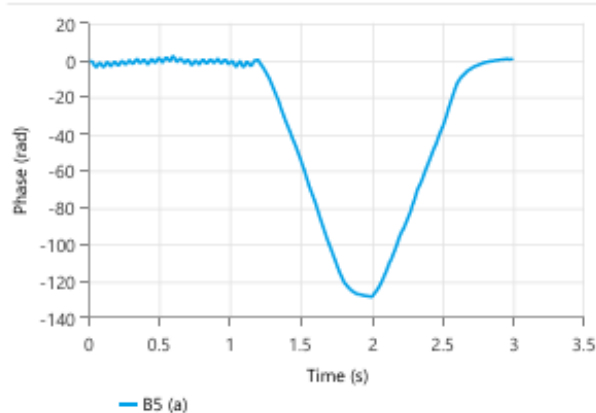
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-15.67	-	-	-15.67	-15.67
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-15.67	-	-	-15.67	-15.67
Conductivity (mS/cm)	0.6389	-	-	0.6389	0.6389
Mobility (µmcm/Vs)	-1.228	-	-	-1.228	-1.228
Wall Zeta Potential (mV)	-18.8	-	-	-18.8	-18.8
Zeta Deviation (mV)	5.836	-	-	5.836	5.836
Derived Mean Count Rate (kcps)	7951	-	-	7951	7951
Reference Beam Count Rate (kcps)	499.1	-	-	499.1	499.1
Quality Factor	2.195	-	-	2.195	2.195



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:27 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



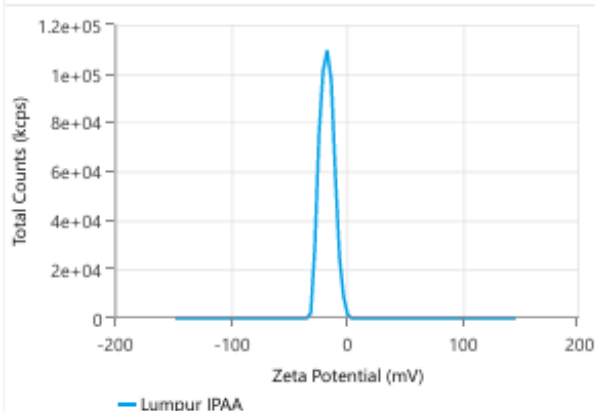
Sample Details

Sample Name: Lumpur IPAA
Project Name: 28 April 2025_Ani_sampel lumpur
Date and Time: Friday, May 9, 2025 7:37:30 AM

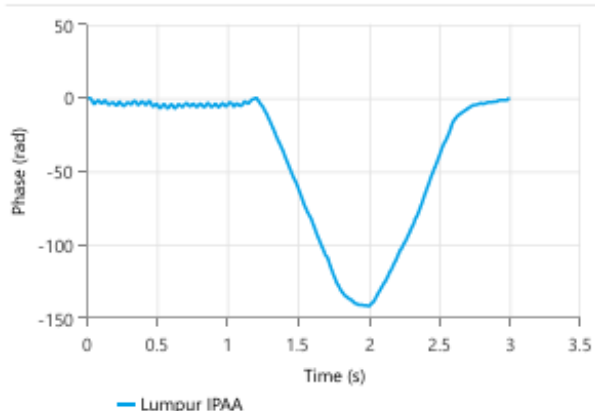
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-17.05	-	-	-17.05	-17.05
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-17.05	-	-	-17.05	-17.05
Conductivity (mS/cm)	0.5509	-	-	0.5509	0.5509
Mobility (µmcm/VS)	-1.335	-	-	-1.335	-1.335
Wall Zeta Potential (mV)	-23.18	-	-	-23.18	-23.18
Zeta Deviation (mV)	5.933	-	-	5.933	5.933
Derived Mean Count Rate (kcps)	6087	-	-	6087	6087
Reference Beam Count Rate (kcps)	452.7	-	-	452.7	452.7
Quality Factor	1.917	-	-	1.917	1.917



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/9/2025 7:43 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



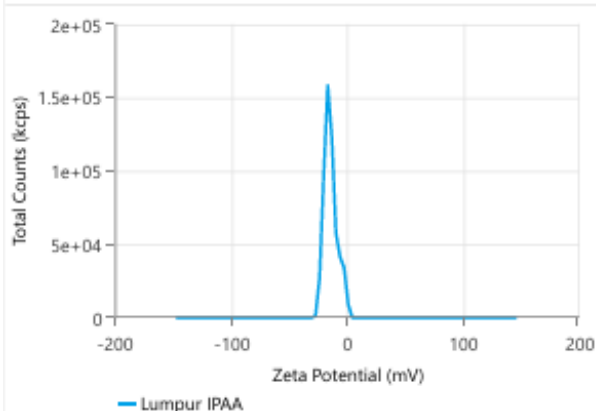
Sample Details

Sample Name: Lumpur IPAA
Project Name: 28 April 2025_Ani_sampel lumpur
Date and Time: Friday, May 9, 2025 7:38:30 AM

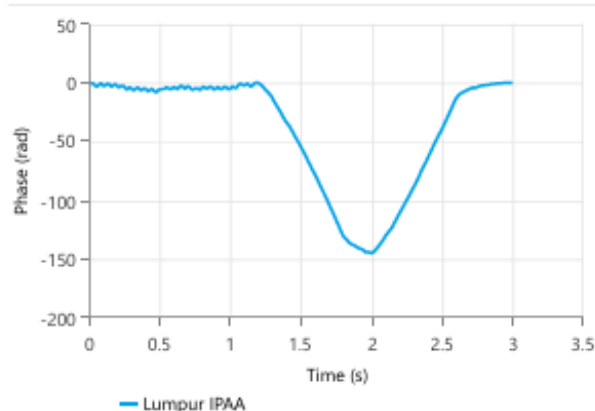
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25.01
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-14.12	-	-	-14.12	-14.12
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-14.12	-	-	-14.12	-14.12
Conductivity (mS/cm)	0.5509	-	-	0.5509	0.5509
Mobility (µmcm/Vs)	-1.106	-	-	-1.106	-1.106
Wall Zeta Potential (mV)	-27.32	-	-	-27.32	-27.32
Zeta Deviation (mV)	5.72	-	-	5.72	5.72
Derived Mean Count Rate (kcps)	6087	-	-	6087	6087
Reference Beam Count Rate (kcps)	452.7	-	-	452.7	452.7
Quality Factor	1.091	-	-	1.091	1.091



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/9/2025 7:44 AM

Zeta Potential Report

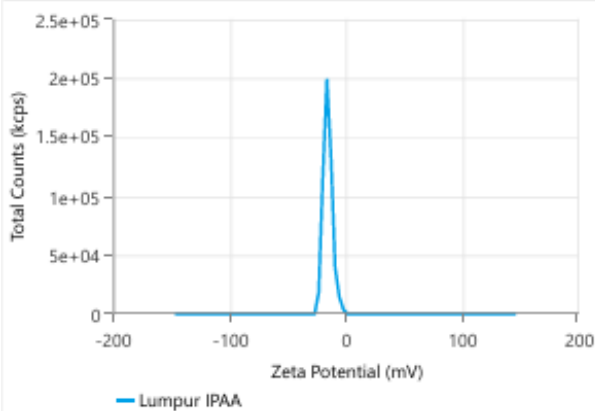
Malvern Panalytical



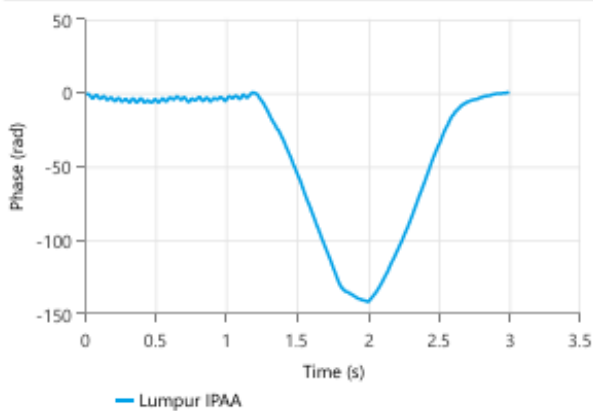
Sample Details

Sample Name:	Lumpur IPAA	Result Source:	Instrument
Project Name:	28 April 2025_Ani_sampel lumpur	Temperature (°C):	25
Date and Time:	Friday, May 9, 2025 7:39:38 AM	Dispersant Name:	Water
Type:	Zeta	Dispersant RI:	1.33
Cell Name:	DTS1070	Dispersant Viscosity (cP):	0.887
Material Name:	Lumpur	Dispersant Dielectric Constant:	78.5
Material RI:	1.52		
Material Absorption:	0.01		

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-15.54	-	-	-15.54	-15.54
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-15.54	-	-	-15.54	-15.54
Conductivity (mS/cm)	0.5509	-	-	0.5509	0.5509
Mobility (µmcm/Vs)	-1.218	-	-	-1.218	-1.218
Wall Zeta Potential (mV)	-24.82	-	-	-24.82	-24.82
Zeta Deviation (mV)	3.929	-	-	3.929	3.929
Derived Mean Count Rate (kcps)	6087	-	-	6087	6087
Reference Beam Count Rate (kcps)	452.7	-	-	452.7	452.7
Quality Factor	1.179	-	-	1.179	1.179



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
Page 1 of 2

ZS XPLORER
Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/9/2025 7:44 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



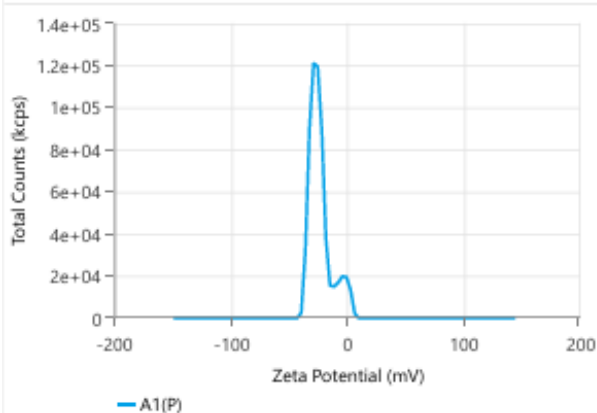
Sample Details

Sample Name: A1(P)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 7:51:23 AM

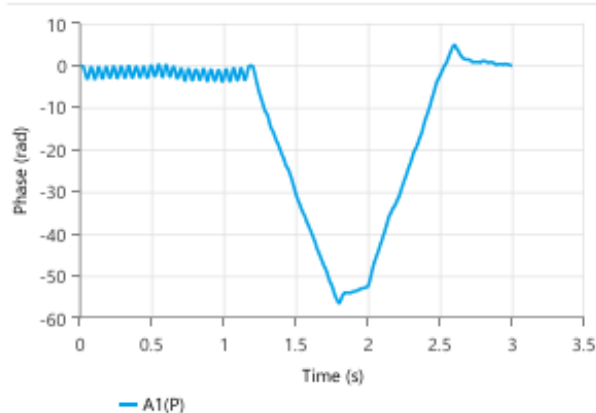
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-23.39	-	-	-23.39	-23.39
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-26.28	-	-	-26.28	-26.28
Zeta Peak 2 Mean (mV)	-3.921	-	-	-3.921	-3.921
Conductivity (mS/cm)	0.5213	-	-	0.5213	0.5213
Mobility (µmcm/Vs)	-1.832	-	-	-1.832	-1.832
Wall Zeta Potential (mV)	8.085	-	-	8.085	8.085
Zeta Deviation (mV)	9.58	-	-	9.58	9.58
Derived Mean Count Rate (kcps)	3.56E+05	-	-	3.56E+05	3.56E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	490.5	-	-	490.5	490.5
Quality Factor	4.568	-	-	4.568	4.568



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:21 AM

Zeta Potential Report

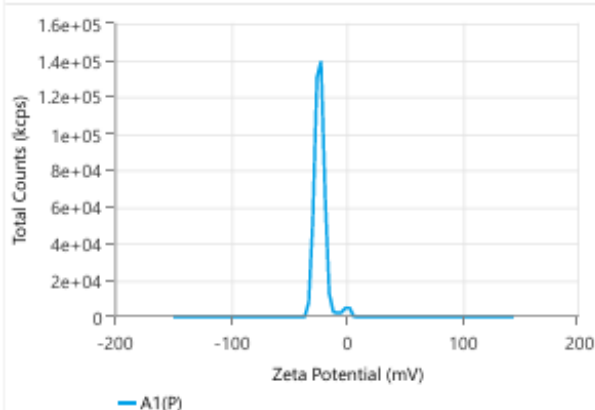
Malvern Panalytical



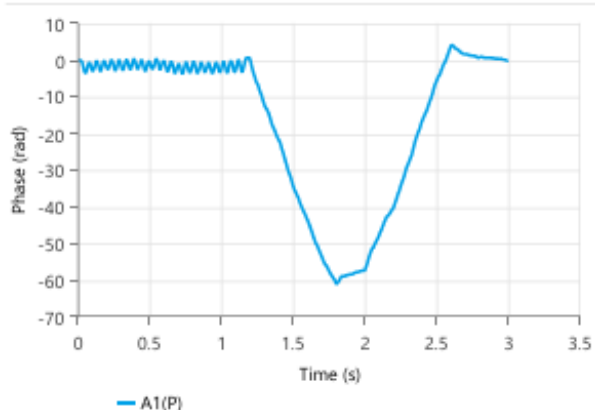
Sample Details

Sample Name: A1(P)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 7:52:18 AM
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01
Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25.01
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-22.85	-	-	-22.85	-22.85
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-23.53	-	-	-23.53	-23.53
Zeta Peak 2 Mean (mV)	-1.361	-	-	-1.361	-1.361
Conductivity (mS/cm)	0.5213	-	-	0.5213	0.5213
Mobility (µmcm/VS)	-1.79	-	-	-1.79	-1.79
Wall Zeta Potential (mV)	6.52	-	-	6.52	6.52
Zeta Deviation (mV)	5.595	-	-	5.595	5.595
Derived Mean Count Rate (kcps)	3.56E+05	-	-	3.56E+05	3.56E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	490.5	-	-	490.5	490.5
Quality Factor	2.547	-	-	2.547	2.547



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:21 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



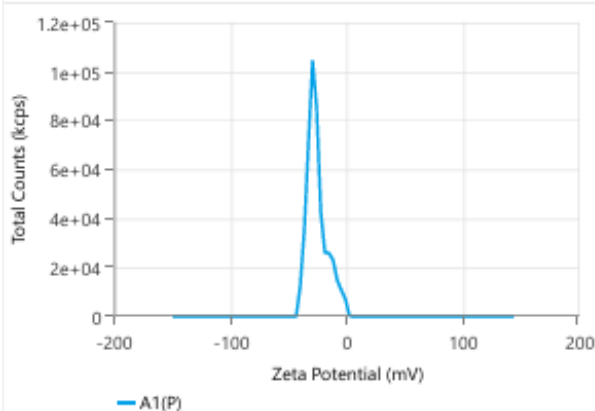
Sample Details

Sample Name: A1(P)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 7:53:13 AM

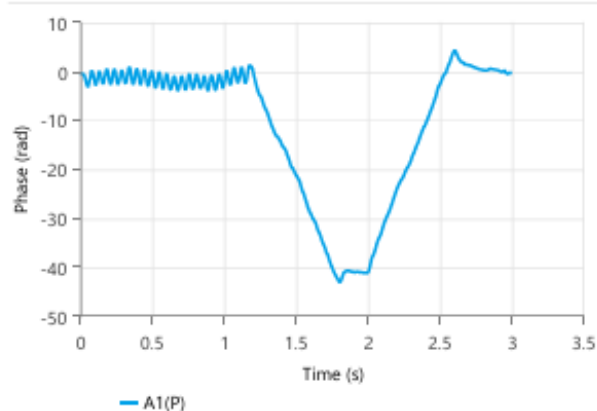
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-25.38	-	-	-25.38	-25.38
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-25.38	-	-	-25.38	-25.38
Conductivity (mS/cm)	0.5213	-	-	0.5213	0.5213
Mobility (µmcm/VS)	-1.988	-	-	-1.988	-1.988
Wall Zeta Potential (mV)	13.19	-	-	13.19	13.19
Zeta Deviation (mV)	8.684	-	-	8.684	8.684
Derived Mean Count Rate (kcps)	3.56E+05	-	-	3.56E+05	3.56E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	490.5	-	-	490.5	490.5
Quality Factor	5.55	-	-	5.55	5.55



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
 Page 1 of 2

ZS XPLOER

Template Created: 5/14/2019
 Printed: 5/23/2025 11:21 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



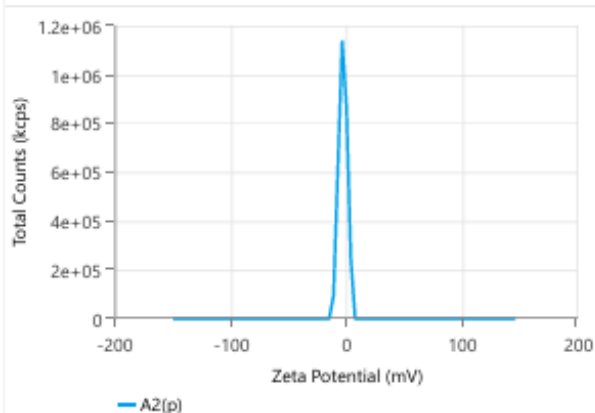
Sample Details

Sample Name: A2(p)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 8:04:14 AM

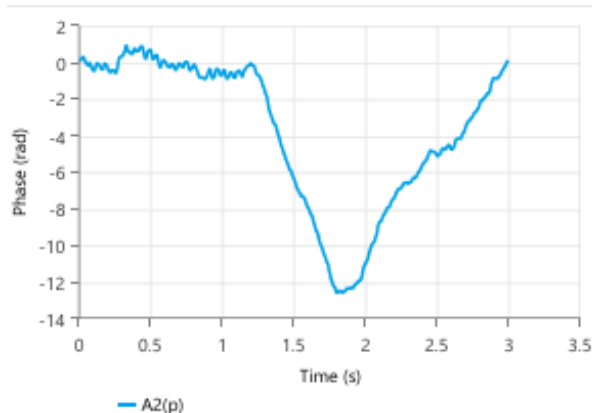
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-2.802	-	-	-2.802	-2.802
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-2.802	-	-	-2.802	-2.802
Conductivity (mS/cm)	2.75	-	-	2.75	2.75
Mobility (µmcm/Vs)	-0.2195	-	-	-0.2195	-0.2195
Wall Zeta Potential (mV)	0.2521	-	-	0.2521	0.2521
Zeta Deviation (mV)	3.594	-	-	3.594	3.594
Derived Mean Count Rate (kcps)	1.218E+05	-	-	1.218E+05	1.218E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	479.2	-	-	479.2	479.2
Quality Factor	0.6251	-	-	0.6251	0.6251



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
 Page 1 of 2

ZS XPLOER

Template Created: 5/14/2019
 Printed: 5/23/2025 11:22 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



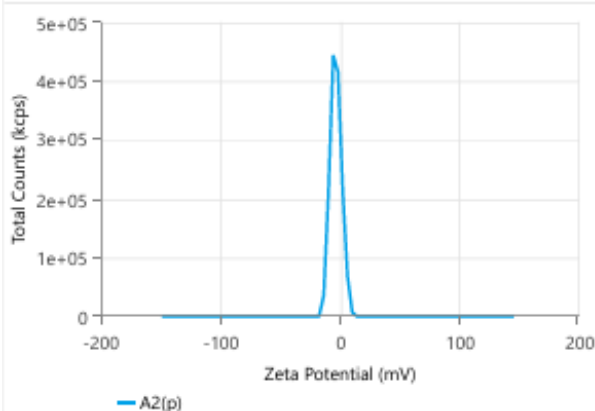
Sample Details

Sample Name: A2(p)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 8:11:07 AM

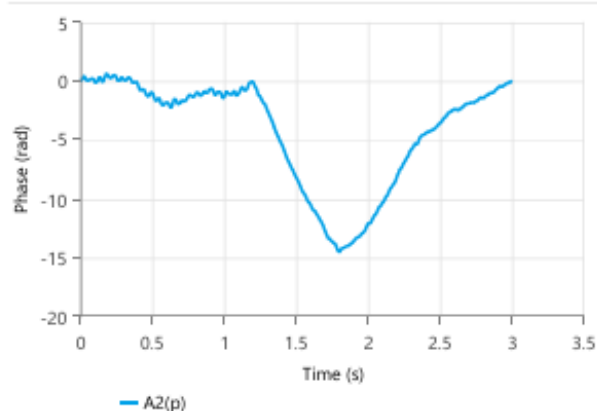
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-3.296	-	-	-3.296	-3.296
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-3.296	-	-	-3.296	-3.296
Conductivity (mS/cm)	2.75	-	-	2.75	2.75
Mobility (µmcm/VS)	-0.2582	-	-	-0.2582	-0.2582
Wall Zeta Potential (mV)	0.2396	-	-	0.2396	0.2396
Zeta Deviation (mV)	4.642	-	-	4.642	4.642
Derived Mean Count Rate (kcps)	1.218E+05	-	-	1.218E+05	1.218E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	479.2	-	-	479.2	479.2
Quality Factor	1.014	-	-	1.014	1.014



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
 Page 1 of 2

ZS XPLOER

Template Created: 5/14/2019
 Printed: 5/23/2025 11:23 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



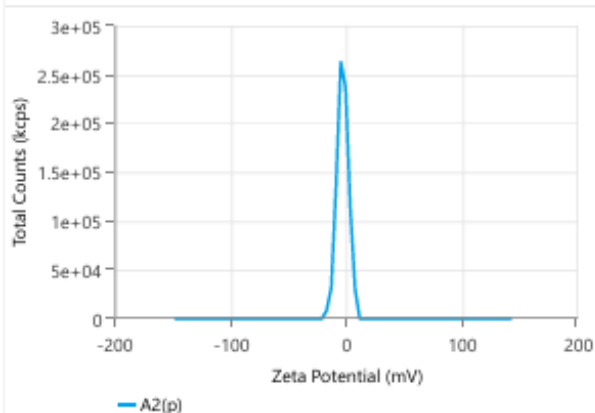
Sample Details

Sample Name: A2(p)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 8:16:49 AM

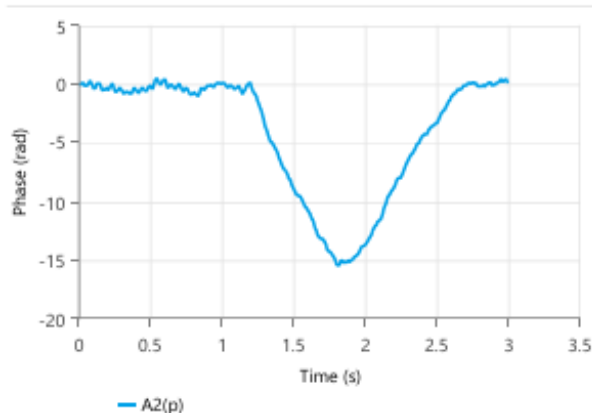
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-3.046	-	-	-3.046	-3.046
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-3.046	-	-	-3.046	-3.046
Conductivity (mS/cm)	2.75	-	-	2.75	2.75
Mobility (µmcm/Vs)	-0.2386	-	-	-0.2386	-0.2386
Wall Zeta Potential (mV)	-0.7456	-	-	-0.7456	-0.7456
Zeta Deviation (mV)	4.904	-	-	4.904	4.904
Derived Mean Count Rate (kcps)	1.218E+05	-	-	1.218E+05	1.218E+05
Reference Beam Count Rate (kcps)	479.2	-	-	479.2	479.2
Quality Factor	1.007	-	-	1.007	1.007



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
 Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
 Printed: 5/23/2025 11:23 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



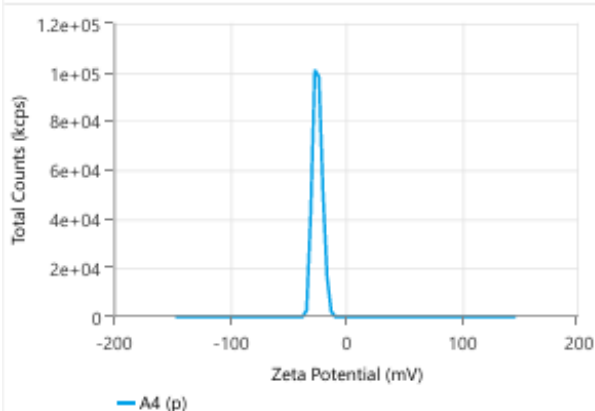
Sample Details

Sample Name: A4 (p)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 8:29:17 AM

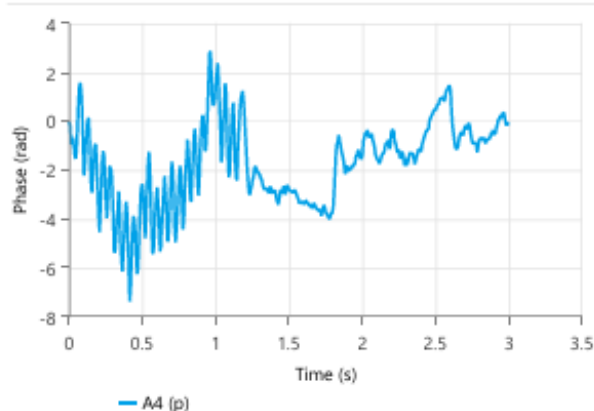
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25.01
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-24.56	-	-	-24.56	-24.56
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-24.56	-	-	-24.56	-24.56
Conductivity (mS/cm)	0.5898	-	-	0.5898	0.5898
Mobility (µmcm/Vs)	-1.924	-	-	-1.924	-1.924
Wall Zeta Potential (mV)	23.3	-	-	23.3	23.3
Zeta Deviation (mV)	3.972	-	-	3.972	3.972
Derived Mean Count Rate (kcps)	868	-	-	868	868
Reference Beam Count Rate (kcps)	495.6	-	-	495.6	495.6
Quality Factor	2.186	-	-	2.186	2.186



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
 Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
 Printed: 5/23/2025 11:24 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



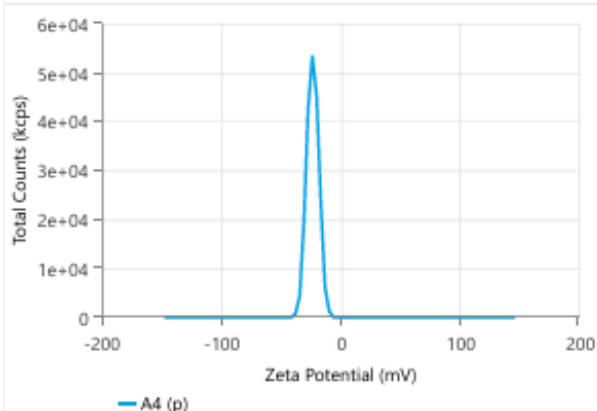
Sample Details

Sample Name: A4 (p)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 8:30:28 AM

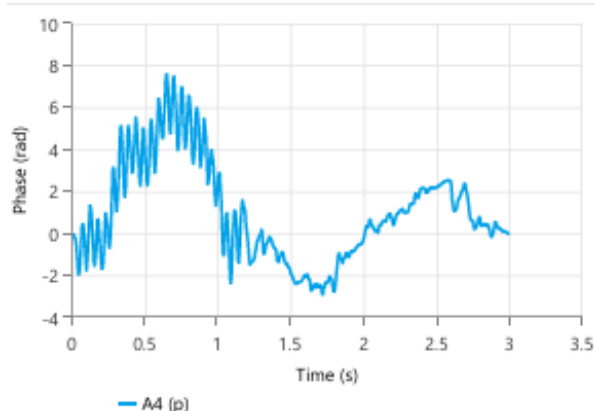
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-23.36	-	-	-23.36	-23.36
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-23.36	-	-	-23.36	-23.36
Conductivity (mS/cm)	0.5898	-	-	0.5898	0.5898
Mobility (µmcm/VS)	-1.83	-	-	-1.83	-1.83
Wall Zeta Potential (mV)	22.93	-	-	22.93	22.93
Zeta Deviation (mV)	4.946	-	-	4.946	4.946
Derived Mean Count Rate (kcps)	868	-	-	868	868
Reference Beam Count Rate (kcps)	495.6	-	-	495.6	495.6
Quality Factor	2.329	-	-	2.329	2.329



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
 Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
 Printed: 5/23/2025 11:24 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



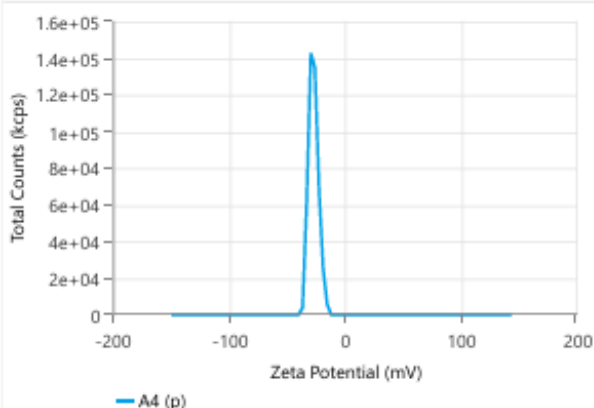
Sample Details

Sample Name: A4 (p)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 8:31:23 AM

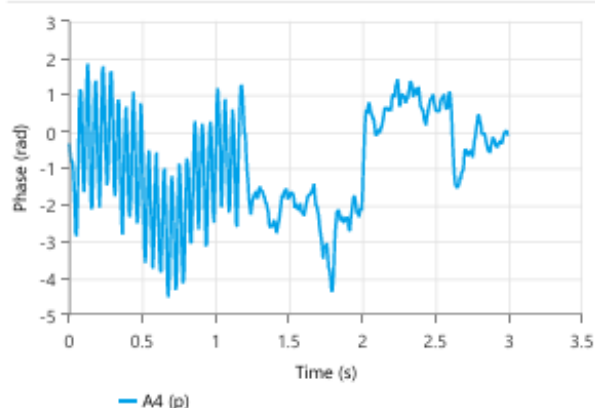
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-27.16	-	-	-27.16	-27.16
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-27.16	-	-	-27.16	-27.16
Conductivity (mS/cm)	0.5898	-	-	0.5898	0.5898
Mobility (µmcm/Vs)	-2.128	-	-	-2.128	-2.128
Wall Zeta Potential (mV)	26.69	-	-	26.69	26.69
Zeta Deviation (mV)	4.12	-	-	4.12	4.12
Derived Mean Count Rate (kcps)	868	-	-	868	868
Reference Beam Count Rate (kcps)	495.6	-	-	495.6	495.6
Quality Factor	2.813	-	-	2.813	2.813



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
Page 1 of 2

ZS XPLOER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:24 AM

Zeta Potential Report

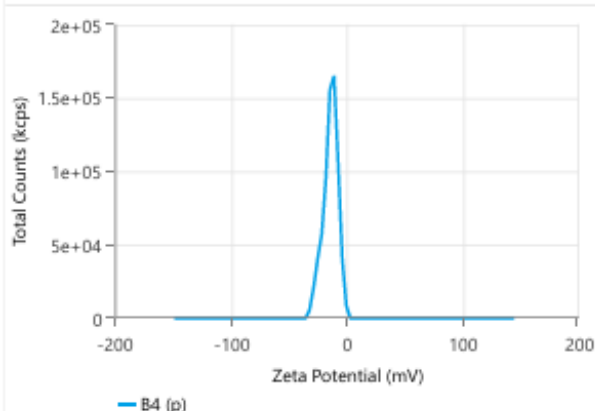
Malvern Panalytical



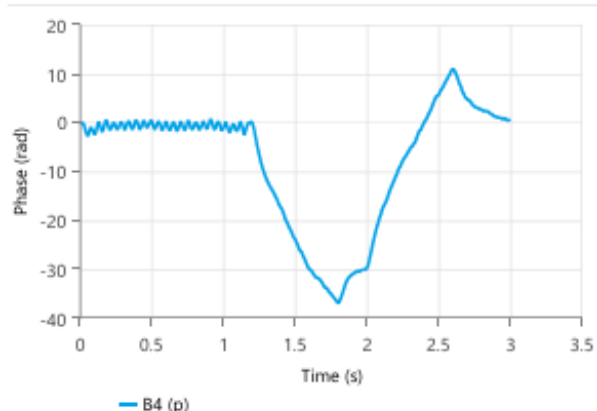
Sample Details

Sample Name: B4 (p)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 10:40:03 AM
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01
Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-14.09	-	-	-14.09	-14.09
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-14.09	-	-	-14.09	-14.09
Conductivity (mS/cm)	0.593	-	-	0.593	0.593
Mobility (µmcm/VS)	-1.104	-	-	-1.104	-1.104
Wall Zeta Potential (mV)	6.022	-	-	6.022	6.022
Zeta Deviation (mV)	6.336	-	-	6.336	6.336
Derived Mean Count Rate (kcps)	3.225E+06	-	-	3.225E+06	3.225E+06
Reference Beam Count Rate (kcps)	501.2	-	-	501.2	501.2
Quality Factor	3.184	-	-	3.184	3.184



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:26 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



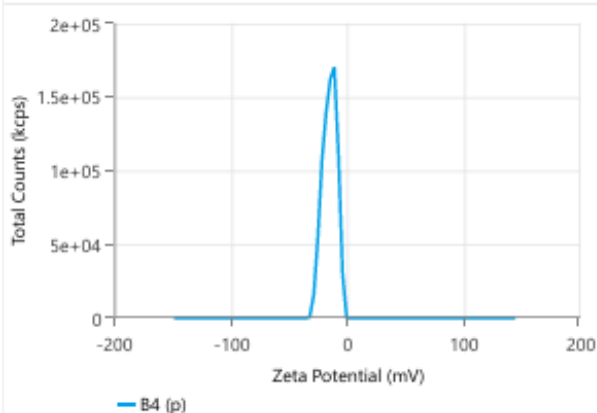
Sample Details

Sample Name: B4 (p)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 10:40:57 AM

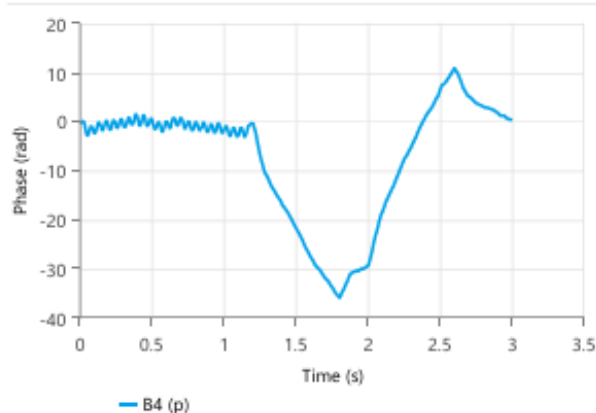
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-15.05	-	-	-15.05	-15.05
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-15.05	-	-	-15.05	-15.05
Conductivity (mS/cm)	0.593	-	-	0.593	0.593
Mobility (µmcm/Vs)	-1.179	-	-	-1.179	-1.179
Wall Zeta Potential (mV)	6.989	-	-	6.989	6.989
Zeta Deviation (mV)	5.899	-	-	5.899	5.899
Derived Mean Count Rate (kcps)	3.225E+06	-	-	3.225E+06	3.225E+06
Reference Beam Count Rate (kcps)	501.2	-	-	501.2	501.2
Quality Factor	3.027	-	-	3.027	3.027



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:26 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



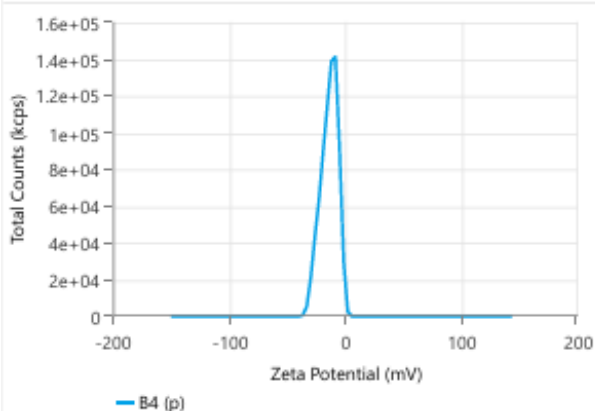
Sample Details

Sample Name: B4 (p)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 10:41:55 AM

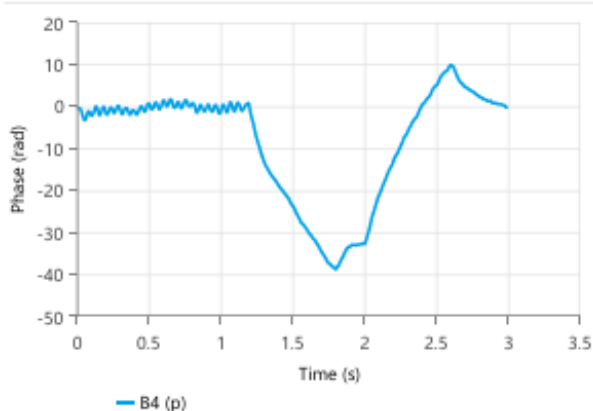
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-13.85	-	-	-13.85	-13.85
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-13.85	-	-	-13.85	-13.85
Conductivity (mS/cm)	0.593	-	-	0.593	0.593
Mobility (µmcm/Vs)	-1.085	-	-	-1.085	-1.085
Wall Zeta Potential (mV)	5.522	-	-	5.522	5.522
Zeta Deviation (mV)	7.255	-	-	7.255	7.255
Derived Mean Count Rate (kcps)	3.225E+06	-	-	3.225E+06	3.225E+06
Reference Beam Count Rate (kcps)	501.2	-	-	501.2	501.2
Quality Factor	1.458	-	-	1.458	1.458



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
 Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
 Printed: 5/23/2025 11:27 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



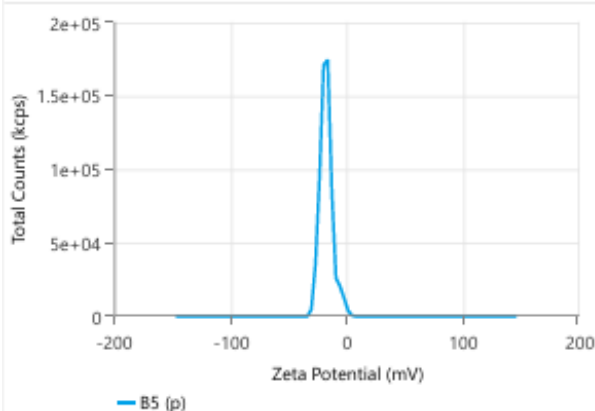
Sample Details

Sample Name: B5 (p)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 10:53:12 AM

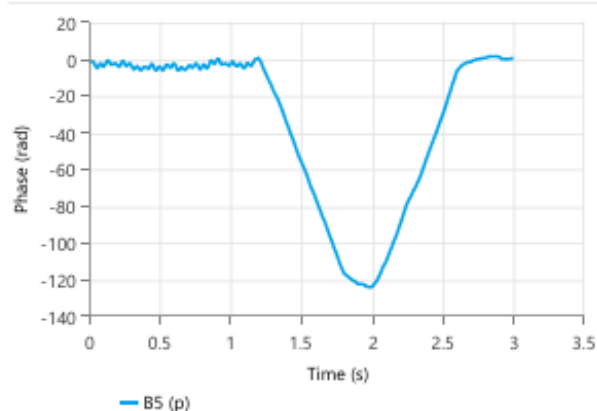
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-17.47	-	-	-17.47	-17.47
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-17.47	-	-	-17.47	-17.47
Conductivity (mS/cm)	0.6011	-	-	0.6011	0.6011
Mobility (µmcm/Vs)	-1.369	-	-	-1.369	-1.369
Wall Zeta Potential (mV)	-17.62	-	-	-17.62	-17.62
Zeta Deviation (mV)	5.549	-	-	5.549	5.549
Derived Mean Count Rate (kcps)	2.907E+04	-	-	2.907E+04	2.907E+04
Reference Beam Count Rate (kcps)	564.6	-	-	564.6	564.6
Quality Factor	1.23	-	-	1.23	1.23



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLOER
Page 1 of 2

ZS XPLOER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:28 AM

Zeta Potential Report

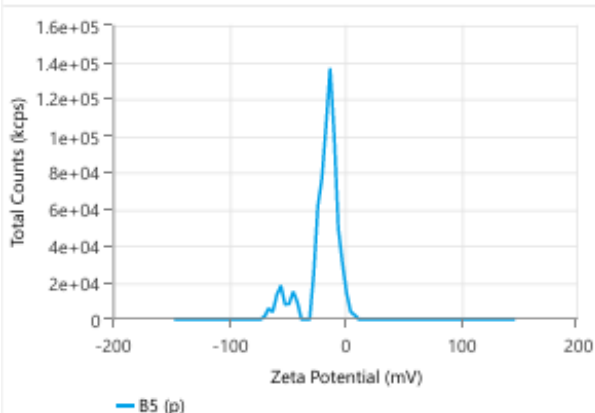
Malvern Panalytical



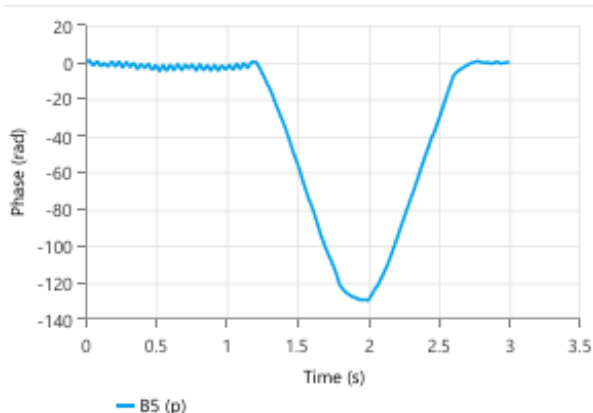
Sample Details

Sample Name: B5 (p)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 10:54:05 AM
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01
Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25.01
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-18.78	-	-	-18.78	-18.78
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-65.3	-	-	-65.3	-65.3
Zeta Peak 2 Mean (mV)	-56.55	-	-	-56.55	-56.55
Conductivity (mS/cm)	0.6011	-	-	0.6011	0.6011
Mobility (µmcm/Vs)	-1.472	-	-	-1.472	-1.472
Wall Zeta Potential (mV)	-17	-	-	-17	-17
Zeta Deviation (mV)	14.52	-	-	14.52	14.52
Derived Mean Count Rate (kcps)	2.907E+04	-	-	2.907E+04	2.907E+04
Reference Beam Count Rate (kcps)	564.6	-	-	564.6	564.6
Quality Factor	1.887	-	-	1.887	1.887



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:28 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



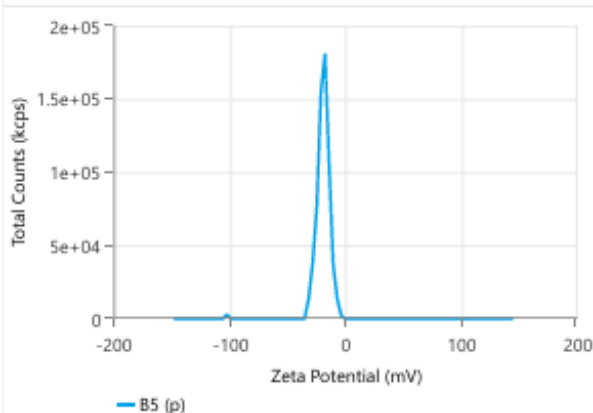
Sample Details

Sample Name: B5 (p)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 10:54:58 AM

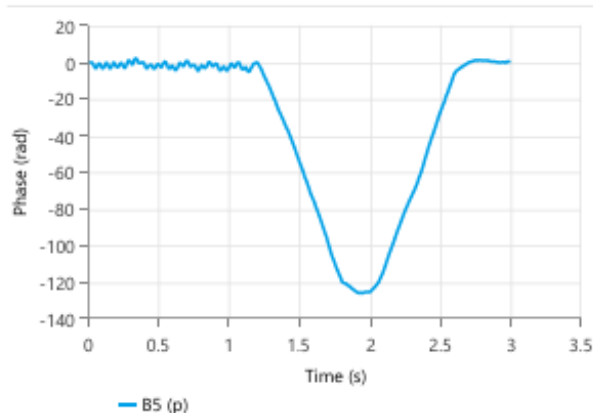
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-19.47	-	-	-19.47	-19.47
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-102.4	-	-	-102.4	-102.4
Zeta Peak 2 Mean (mV)	-19.09	-	-	-19.09	-19.09
Conductivity (mS/cm)	0.6011	-	-	0.6011	0.6011
Mobility (µmcm/Vs)	-1.525	-	-	-1.525	-1.525
Wall Zeta Potential (mV)	-16.91	-	-	-16.91	-16.91
Zeta Deviation (mV)	7.619	-	-	7.619	7.619
Derived Mean Count Rate (kcps)	2.907E+04	-	-	2.907E+04	2.907E+04
Reference Beam Count Rate (kcps)	564.6	-	-	564.6	564.6
Quality Factor	1.448	-	-	1.448	1.448



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
 Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
 Printed: 5/23/2025 11:28 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



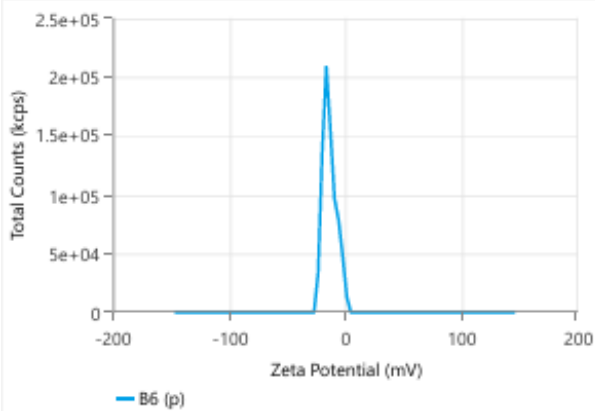
Sample Details

Sample Name: B6 (p)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 10:58:48 AM

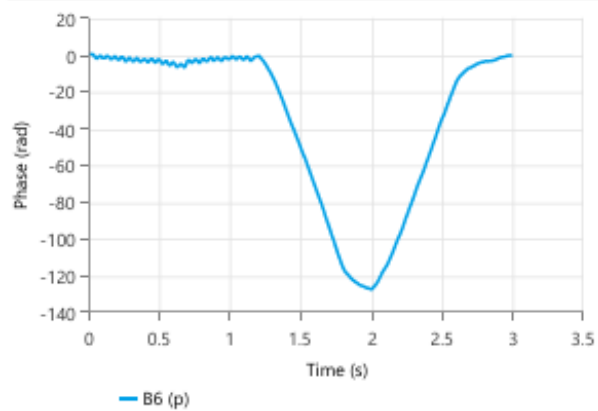
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-13.47	-	-	-13.47	-13.47
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-13.47	-	-	-13.47	-13.47
Conductivity (mS/cm)	0.7096	-	-	0.7096	0.7096
Mobility (µmcm/Vs)	-1.055	-	-	-1.055	-1.055
Wall Zeta Potential (mV)	-22.25	-	-	-22.25	-22.25
Zeta Deviation (mV)	5.81	-	-	5.81	5.81
Derived Mean Count Rate (kcps)	5.572E+04	-	-	5.572E+04	5.572E+04
Reference Beam Count Rate (kcps)	533.1	-	-	533.1	533.1
Quality Factor	1.349	-	-	1.349	1.349



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:28 AM

Zeta Potential Report

Malvern Panalytical



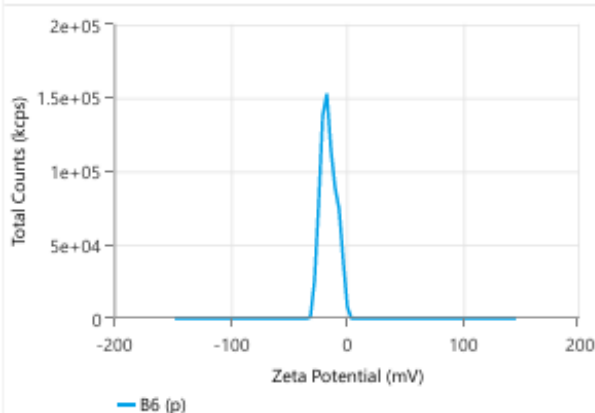
Sample Details

Sample Name: B6 (p)
Project Name: 23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI
Date and Time: Friday, May 23, 2025 10:59:45 AM

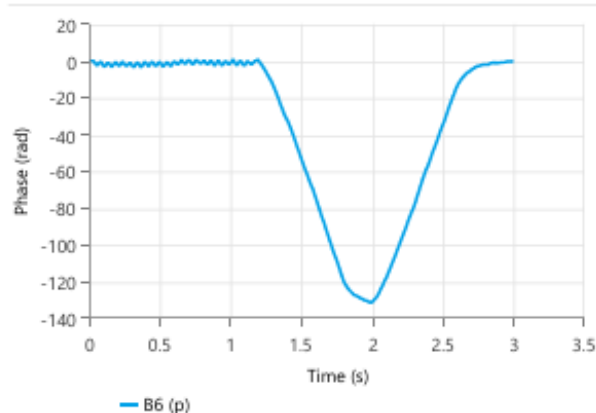
Type: Zeta
Cell Name: DTS1070
Material Name: Lumpur
Material RI: 1.52
Material Absorption: 0.01

Result Source: Instrument
Temperature (°C): 25
Dispersant Name: Water
Dispersant RI: 1.33
Dispersant Viscosity (cP): 0.887
Dispersant Dielectric Constant: 78.5

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-15.43	-	-	-15.43	-15.43
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-15.43	-	-	-15.43	-15.43
Conductivity (mS/cm)	0.7096	-	-	0.7096	0.7096
Mobility (µmcm/Vs)	-1.209	-	-	-1.209	-1.209
Wall Zeta Potential (mV)	-20.09	-	-	-20.09	-20.09
Zeta Deviation (mV)	6.573	-	-	6.573	6.573
Derived Mean Count Rate (kcps)	5.572E+04	-	-	5.572E+04	5.572E+04
Reference Beam Count Rate (kcps)	533.1	-	-	533.1	533.1
Quality Factor	2.323	-	-	2.323	2.323



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
 Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
 Printed: 5/23/2025 11:29 AM

Zeta Potential Report

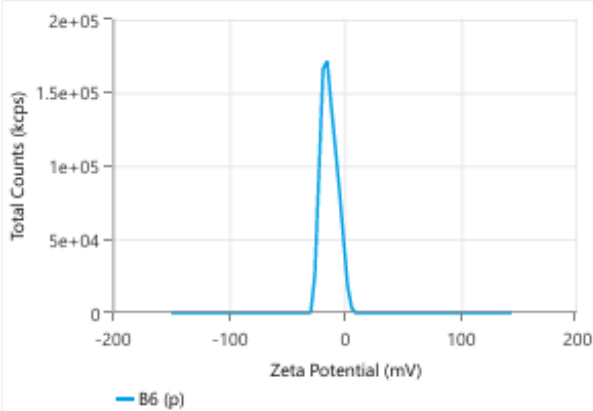
Malvern Panalytical



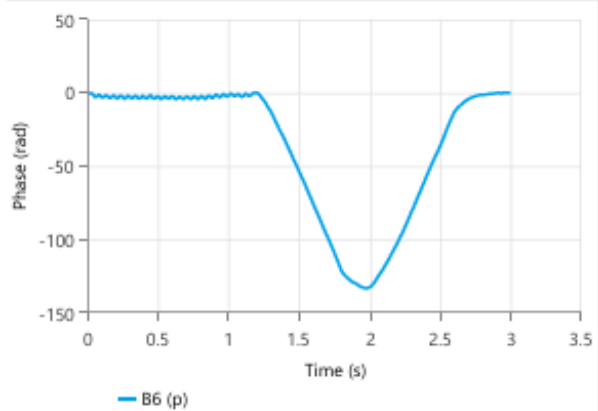
Sample Details

Sample Name:	B6 (p)	Result Source:	Instrument
Project Name:	23 Mei 2025_TEKNIK LINGKUNGAN_ANI	Temperature (°C):	25
Date and Time:	Friday, May 23, 2025 11:00:38 AM	Dispersant Name:	Water
Type:	Zeta	Dispersant RI:	1.33
Cell Name:	DTS1070	Dispersant Viscosity (cP):	0.887
Material Name:	Lumpur	Dispersant Dielectric Constant:	78.5
Material RI:	1.52		
Material Absorption:	0.01		

Zeta Potential Distribution



Phase Plot



Statistics Table

Name	Mean	Standard Deviation	RSD	Minimum	Maximum
Zeta Potential (mV)	-13.19	-	-	-13.19	-13.19
Zeta Peak 1 Mean (mV)	-13.19	-	-	-13.19	-13.19
Conductivity (mS/cm)	0.7096	-	-	0.7096	0.7096
Mobility (µmcm/Vs)	-1.033	-	-	-1.033	-1.033
Wall Zeta Potential (mV)	-22.68	-	-	-22.68	-22.68
Zeta Deviation (mV)	6.805	-	-	6.805	6.805
Derived Mean Count Rate (kcps)	5.572E+04	-	-	5.572E+04	5.572E+04
Reference Beam Count Rate (kcps)	533.1	-	-	533.1	533.1
Quality Factor	2.033	-	-	2.033	2.033



Malvern Panalytical Ltd.
www.malvernpanalytical.com

ZS XPLORER
Page 1 of 2

ZS XPLORER

Template Created: 5/14/2019
Printed: 5/23/2025 11:29 AM

- Hasil Uji PSA

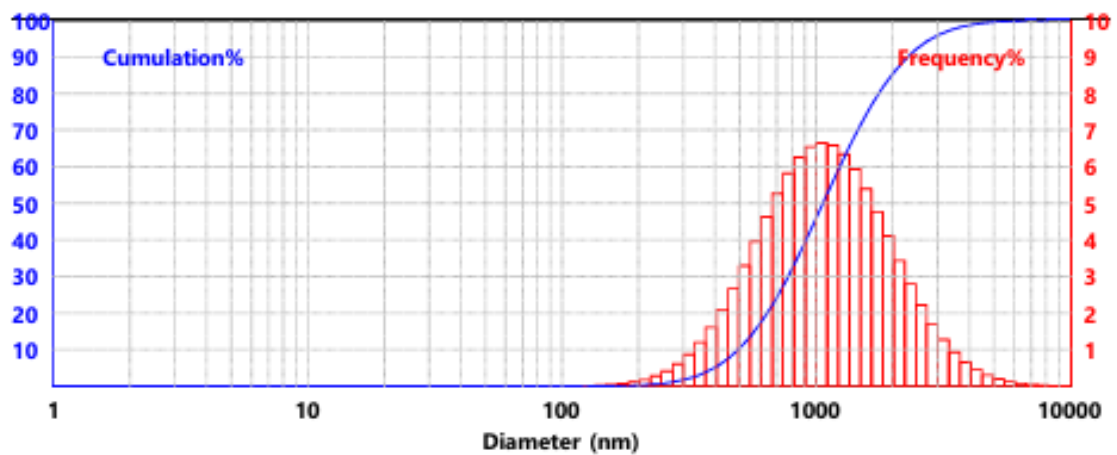
BIOBASE

Nano Particle Size Analyzer test report
BK-802N

Measurement range: 1-10000 nm

Print Time: 6/18/2025 2:37:53 PM

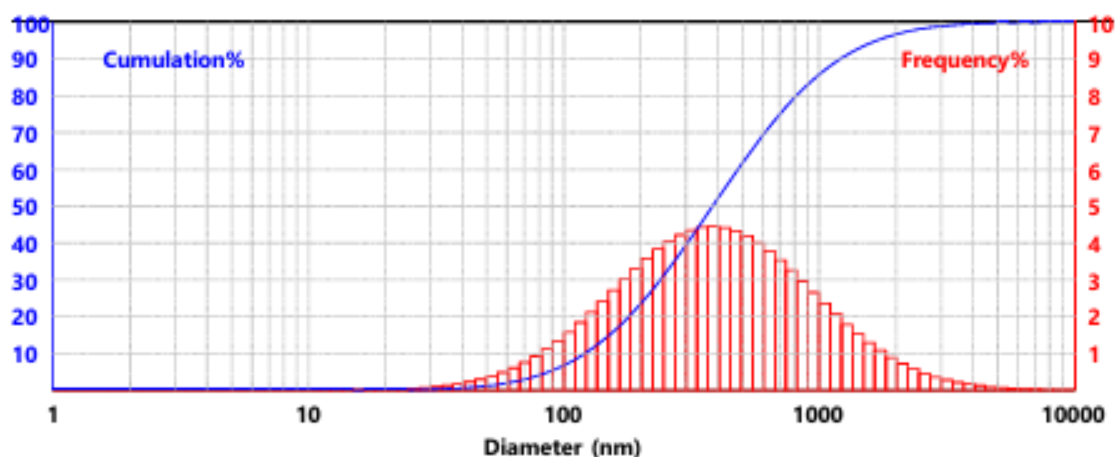
Sample information		
Sample name: Sampel A0 (a)		
Sample supplier: Institut Teknologi Sepuluh November		
Test Condition		
Test temperature: 20°C	Dispersion medium: Water	Medium viscosity: 1.002E-03Pa.s
Medium refractive index: 1.333	Angle: 90.0Deg	Delay Unit Time: 20us
LightColor: Red		
Test Information		
Test company: LIHTR		
Tester: LIHTR	Test time: 6/18/2025 2:37:53 PM	
Test Result:		
Dav Diameter: Xav=1918.38 nm	Dispersion Index: PI=0.4337	Photon Count: 28
D10= 492.77 nm	D50= 1064.08 nm	D90= 2298.77 nm



Measurement range: 1-10000 nm

Print Time: 6/18/2025 2:25:21 PM

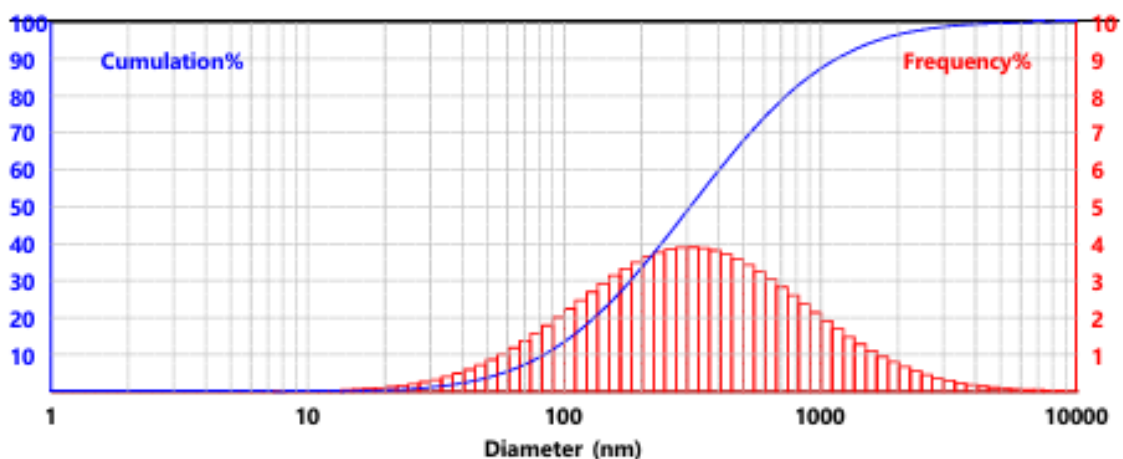
Sample information		
Sample name: Sampel A1 (a)		
Sample supplier: Institut Teknologi Sepuluh Noverber		
Test Condition		
Test temperature: 20°C	Dispersion medium: Water	Medium viscosity: 1.002E-03Pa·s
Medium refractive index: 1.333	Angle: 90.0Deg	Delay Unit Time: 20us
LightColor: Red		
Test Information		
Test company: LIHTR		
Tester: LIHTR	Test time: 6/18/2025 2:25:20 PM	
Test Result:		
Dav Diameter: Xav=1346.67 nm	Dispersion Index: PI=1.2380	Photon Count: 19
D10= 121.16 nm	D50= 383 nm	D90= 1208.57 nm



Measurement range: 1-10000 nm

Print Time: 6/18/2025 2:27:19 PM

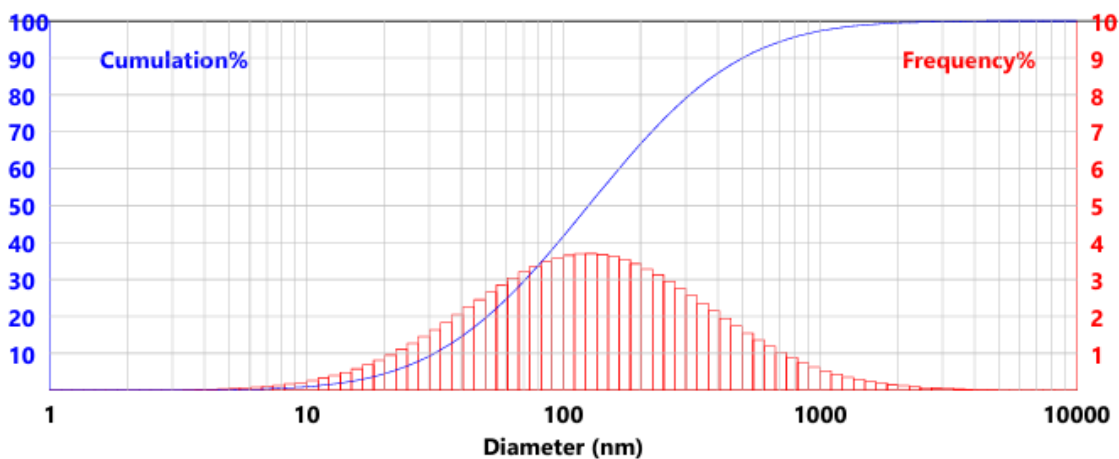
Sample information		
Sample name: Sampel B3 (a)		
Sample supplier: Institut Teknologi Sepuluh November		
Test Condition		
Test temperature: 20°C	Dispersion medium: Water	Medium viscosity: 1.002E-03Pa·s
Medium refractive index: 1.333	Angle: 90.0Deg	Delay Unit Time: 20us
LightColor: Red		
Test Information		
Test company: LIHTR		
Tester: LIHTR	Test time: 6/18/2025 2:27:19 PM	
Test Result:		
Dav Diameter: Xav=1562.60 nm	Dispersion Index: PI=1.8466	Photon Count: 23
D10= 83.45 nm	D50= 309.66 nm	D90= 1148.23 nm



Measurement range: 1-10000 nm

Print Time: 6/18/2025 2:34:39 PM

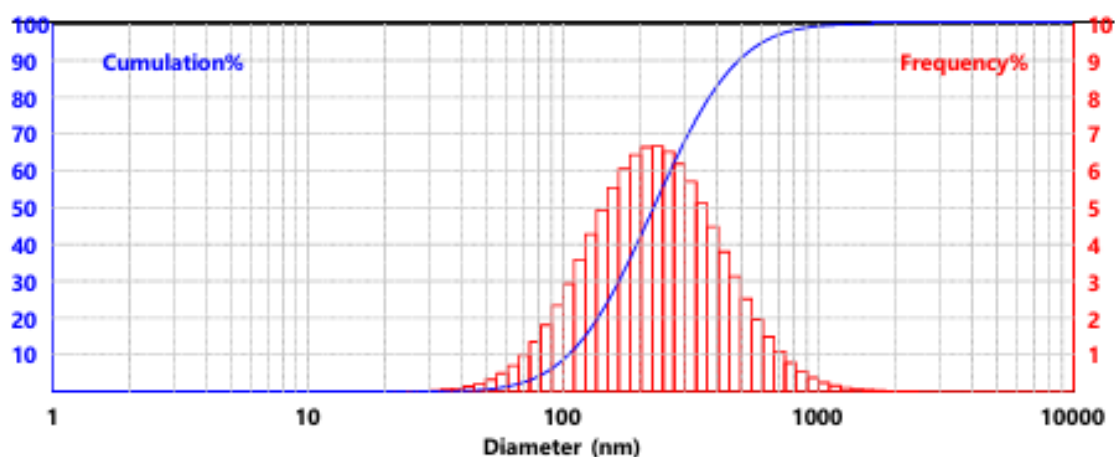
Sample information		
Sample name: Sampel A0 (p)		
Sample supplier: Institut Teknologi Sepuluh November		
Test Condition		
Test temperature: 20°C	Dispersion medium: Water	Medium viscosity: 1.002E-03Pa·s
Medium refractive index: 1.333	Angle: 90.0Deg	Delay Unit Time: 20us
LightColor: Red		
Test Information		
Test company: LIHTR		
Tester: LIHTR	Test time: 6/18/2025 2:34:38 PM	
Test Result:		
Dav Diameter: Xav=757.50 nm	Dispersion Index: PI=2.2080	Photon Count: 101
D10= 31.44 nm	D50= 125.52 nm	D90= 500.35 nm



Measurement range: 1-10000 nm

Print Time: 6/18/2025 2:42:13 PM

Sample information		
Sample name: Sampel A2 (p)		
Sample supplier: Institut Teknologi Sepuluh November		
Test Condition		
Test temperature: 20°C	Dispersion medium: Water	Medium viscosity: 1.002E-03Pa·s
Medium refractive index: 1.333	Angle: 90.0Deg	Delay Unit Time: 20us
LightColor: Red		
Test Information		
Test company: LIHTR		
Tester: LIHTR	Test time: 6/18/2025 2:42:13 PM	
Test Result:		
Dav Diameter: Xav=406.14 nm	Dispersion Index: PI=0.4291	Photon Count: 81
D10= 105.08 nm	D50= 226.28 nm	D90= 487.07 nm



Measurement range: 1-10000 nm

Print Time: 6/18/2025 2:31:19 PM

Sample information

Sample name: Sampel B4 (p)

Sample supplier: Institut Teknologi Sepuluh November

Test Condition

Test temperature: 20°C

Dispersion medium: Water

Medium viscosity: 1.002E-03Pa·s

Medium refractive index: 1.333

Angle: 90.0Deg

Delay Unit Time: 20us

LightColor: Red

Test Information

Test company: LIHTR

Tester: LIHTR

Test time: 6/18/2025 2:31:19 PM

Test Result:

Dav Diameter: Xav=441.87 nm

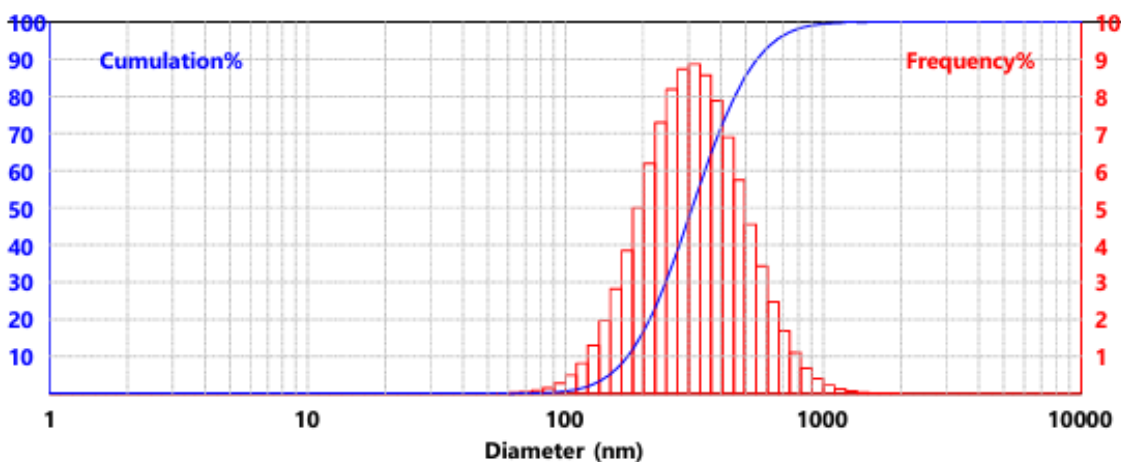
Dispersion Index: PI=0.2242

Photon Count: 46

D10= 174.16 nm

D50= 310.65 nm

D90= 552.19 nm



LAMPIRAN 6
FORM FTA-03 KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR



DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

FORM FTA-03

KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : Ani Anggraeni
NRP : 5019211060
Judul : Pengaruh Penambahan Biji kelor (*Moringa oleifera*) pada Proses Pengkondisian Lumpur Mengandung Aluminium Sulfat dan Poly Aluminium chloride (PAC)

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1.	25/02 2025	Perbaikan proposal Tugas akhir, meliputi metode penentuan dosis biji kelor	#
2.	11/03 2025	Fiksasi metode penelitian secara keseluruhan	#
3.	11/04 2025	Penambahan parameter uji, yaitu SEM-EDX dan FTIR	#
4.	29/04 2025	Pembahasan outline bab 4 (hasil dan pembahasan) serta hasil uji lab	#
5.	7/05 2025	Bimbingan untuk seminar kemajuan tugas akhir, membahas bab 4 dan kesimpulan sementara	#
6.	16/05 2025	Diskusi lanjutan uji zeta potensial, SEM-EDX, dan FTIR	#
7.	26/05 2025	Penambahan parameter uji PSA (Partide Size Analyzer)	#
8.	19/06 2025	Draft laporan tugas akhir	#
Kesimpulan -			

Surabaya, 19 Juni 2025
Dosen Pembimbing

Nama Dosen Pembimbing
Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19730601 200003 1 001

LAMPIRAN 7
KTa-03 FORMULIR RINGKASAN DAN SARAN DOSEN PEMBIMBING SEMINAR
KEMAJUAN TUGAS AKHIR



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN-ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

KTa-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Gasal 2024/2025

Kode/SKS : CL234801 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR KTA-02
Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing
Seminar Kemajuan Tugas Akhir

Hari, tanggal : Jum'at, 23 Mei 2025

Nilai TOEFL : 487

Pukul : 15.00 - 16.00

Lokasi : Ruang Sidang

Judul : Pengaruh Penambahan Biji Kelor (*Moringa oleifera*) pada Proses Pengkondisian Lumpur Mengandung Aluminium Sulfat dan Poly Aluminium Chloride (PAC)

Nama : Ani Anggraeni

Tanda Tangan

NRP. : 5014211060

Topik : Penelitian

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Seminar Kemajuan Tugas Akhir
1.	Particle Size Distribution Analysis.
2.	Hubungan konsentrasi benih kelor dgn PAC & slur.
3.	Tambahan dasar teori ttg pengolahan lumpur.
	
	

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir KTA-02 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Pembimbing
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Berdasarkan hasil evaluasi Dosen Pengarah dan Dosen Pembimbing, dinyatakan mahasiswa tersebut:

1. Dapat melanjutkan ke Tahap Ujian Tugas Akhir
2. Tidak dapat melanjutkan ke Tahap Ujian Tugas Akhir

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

LAMPIRAN 8
KTA-03 FORMULIR RINGKASAN DAN SARAN DOSEN PENGARAH SEMINAR
KEMAJUAN TUGAS AKHIR



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN-ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

KTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Gasal 2024/2025

Kode/SKS : CL234801 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR KTA-03
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Pengarah
Seminar Kemajuan Tugas Akhir

Hari, tanggal : Jum'at, 23 Mei 2025
Pukul : 15.00 - 16.00
Lokasi : Ruang Sidang
Judul : Pengaruh Penambahan Biji Kelor (*Moringa oleifera*) pada Proses Pengkondisian Lumpur
Mengandung Aluminium Sulfat dan Poly Aluminium Chloride (PAC)
Nama : Ani Anggraeni
NRP. : 5014211060
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Pengarah Seminar Kemajuan Tugas Akhir
1.	Penyamaan sb. y $\rightarrow$ # 25, 28, 30, 31.
2.	KSp.

Formulir KTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir KTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana

Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Pengarah

Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pengarah dan Dosen Pembimbing

Dosen Pengarah Prof. Ir. Eddy Setiadi Soedjono, Dipl.SE, M.Sc, Ph.D.

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

[Handwritten signature]



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN-ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

KTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Gasal 2024/2025

Kode/SKS : CL234801 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR KTA-03
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Pengarah
Seminar Kemajuan Tugas Akhir

Hari, tanggal : Jum'at, 23 Mei 2025
Pukul : 15.00 - 16.00
Lokasi : Ruang Sidang
Judul : Pengaruh Penambahan Biji Kelor (*Moringa oleifera*) pada Proses Pengkondisian Lumpur Mengandung Aluminium Sulfat dan Poly Aluminium Chloride (PAC)
Nama : Ani Anggraeni
NRP. : 5014211060
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Pengarah Seminar Kemajuan Tugas Akhir
1.	Metodologi disesuaikan dgn perubahan pelaksanaan penelitian
2.	penulisan diperbaiki
3.	Mengapa serbuk sesuai dgn alum & ekstrak sesuai dgn PAC ?

Formulir KTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir KTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Pengarah
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pengarah dan Dosen Pembimbing

Dosen Pengarah Alfan Purnomo, ST., MT.

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

19/06 2025

LAMPIRAN 9
UTA-03 FORMULIR PERTANYAAN DAN SARAN DOSEN PEMBIMBING UJIAN
LISAN TUGAS AKHIR



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-02 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2024/2025

Kode/SKS : CL234801 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-02
Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Jumat, 4 Juli 2025

Nilai TOEFL 487

Pukul : 09.30-11.00 WIB

Lokasi : TL-101

Judul : Pengaruh Penambahan Biji Kelor (*Moringa oleifera*) pada Proses Pengkondisian Lumpur Mengandung Aluminium Sulfat dan Poly Aluminium Chloride (PAC)

Nama : Ani Anggraeni

Tanda Tangan

NRP. : 5014211060

Topik : Penelitian

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir
1.	Perbaiki Abstrak, Urutan Ringkasan
2.	Sumber buku dan abstrak moringa yg di gunakan.
B.	

Juli 18/25

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-02 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus dibawa mahasiswa saat asistensi kepada Dosen Pembimbing
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Berdasarkan hasil evaluasi Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing, dinyatakan mahasiswa tersebut:

1. Lulus Ujian Tugas Akhir
2. Harus mengulang Ujian Tugas Akhir semester berikutnya
3. Tugas Akhir dinyatakan gagal atau harus mengganti Tugas Akhir (lebih dari 2 semester)

Dosen Pembimbing

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

[Signature]

LAMPIRAN 10
UTA-03 FORMULIR PERTANYAAN DAN SARAN DOSEN PENGARAH UJIAN
LISAN TUGAS AKHIR



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
 FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN - ITS
 Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
 Periode: Genap 2024/2025

Kode/SKS : CL234801 (0/6/0)
 No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Jumat, 4 Juli 2025
 Pukul : 09.30-11.00 WIB
 Lokasi : TL-101
 Judul : Pengaruh Penambahan Biji Kelor (*Moringa oleifera*) pada Proses Pengkondisian Lumpur Mengandung Aluminium Sulfat dan Poly Aluminium Chloride (PAC)
 Nama : Ani Anggraeni
 NRP. : 5014211060
 Topik : Penelitian

#18
 #24, 27

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1.	Reaksi dasar lumpur dan moringa! Sehingga pH & T uranium bisa jadi tidak berdampak! Bisa jadi tinggal kekeruhannya saja yg terdampak, bukan pH & T!

[Signature] 18/7/25

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Ujian Tugas Akhir selesai.
 Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
 Formulir ini harus dibawa mahasiswa saat asistansi kepada Dosen Penguji
 Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji Prof. Ir. Eddy Setiadi Soedjono, Dipl. SE., M.Sc., Ph. D.

Dosen Pembimbing Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D.

[Signature]
[Signature]



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2024/2025

Kode/SKS : CL234801 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Jumat, 4 Juli 2025
Pukul : 09.30-11.00 WIB
Lokasi : TL-101
Judul : Pengaruh Penambahan Biji Kelor (*Moringa oleifera*) pada Proses Pengkondisian Lumpur Mengandung Aluminium Sulfat dan Poly Aluminium Chloride (PAC)
Nama : Ani Anggraeni
NRP. : 5014211060
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1.	Kata pengantar diperbaiki
2.	Biji kelor vs matahari → waktu pengeringan
3.	Elektrolit vs serbuk
4.	Grafik diperbaiki
	<i>[Signature]</i> 16/7 2025

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Ujian Tugas Akhir selesai.
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus dibawa mahasiswa saat asistensi kepada Dosen Penguji
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji : Alfan Purnomo, ST., MT.

Dosen Pembimbing : Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D.

[Signature]



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5926387

UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2024/2025

Kode/SKS : CL234801 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Jumat, 4 Juli 2025
Pukul : 09.30-11.00 WIB
Lokasi : TL-101
Judul : Pengaruh Penambahan Biji Kelor (*Moringa oleifera*) pada Proses Pengkondisian Lumpur
Mengandung Aluminium Sulfat dan Poly Aluminium Chloride (PAC)
Nama : Ani Anggraeni
NRP. : 5014211060
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1	perbedaan lumpur PAC & alum dari sumber belum dijelaskan
2	hasil analisis sampel lumpur dijelaskan.
3.	rekomendasi perlu diupgrade (kesimpulan & saran)
4.	penyisiran metode & elektrode
	16.7.25 
*	Beberapa catatan/masukan ada di draft/buku.

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Ujian Tugas Akhir selesai.
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus dibawa mahasiswa saat asistensi kepada Dosen Penguji
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji Achmad Muzakky, S.T., M.Sc.

Dosen Pembimbing Adhi Yuniarto, S.T., M.T., Ph.D.



BIOGRAFI PENULIS



Penulis dengan nama lengkap Ani Anggraeni dilahirkan di Kota/Kab. Gresik, Provinsi Jawa Timur pada tanggal 16 Juni 2003. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Pendidikan yang telah ditempuh oleh penulis, antara lain UPT SD Negeri 30 Gresik, SMP Negeri 1 Gresik, dan SMA Negeri 1 Gresik. Pada tahun 2021, penulis melanjutkan pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Departemen Teknik Lingkungan FTSPK-ITS.

Selama masa perkuliahan, penulis tergabung dalam komunitas KPPL (Kelompok Pecinta dan Pemerhati Lingkungan) sebagai anggota biro aksi. Penulis juga menjadi asisten laboratorium untuk mata kuliah Kimia Dasar 2, Teknik Analisis Pencemar Lingkungan, Unit Proses, dan Unit Operasi. Beberapa kegiatan pelatihan, webinar, dan kepanitiaan yang diselenggarakan pihak eksternal maupun internal ITS telah diikuti penulis sebagai bentuk pengembangan diri. Penulis juga meraih pendanaan Simbelmawa dalam Program Kreativitas Mahasiswa - Video Gagasan Konstruktif (PKM-VGK) pada tahun 2024. Penulis berkesempatan menjalani Kerja Praktik di Unit Pelaksana Teknis Keselamatan Kerja (UPT K2) Surabaya dan magang di Dinas Lingkungan Hidup Surabaya bidang Pemantauan dan Pengendalian Kualitas Lingkungan Hidup. Apabila terdapat kritik, saran, dan pertanyaan yang ingin disampaikan oleh pembaca mengenai studi ini kepada penulis, dapat melalui email aniangg04@gmail.com.