



TUGAS AKHIR - RE 184804

**PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI BATIK
MENGUNAKAN KOAGULASI KIMIA DAN ECENG
GONDOK DENGAN BIOAUGMENTASI MENGGUNAKAN
*Pseudomonas aeruginosa***

Kita Pritasari A.
0321154000092

DOSEN PEMBIMBING:
Harmin Sulistyaning Titah, ST., MT., Ph.D.

Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - RE 184804

**PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI BATIK
MENGUNAKAN KOAGULASI KIMIA DAN ECENG GONDOK
DENGAN BIOAUGMENTASI MENGGUNAKAN
*Pseudomonas aeruginosa***

Kita Pritasari A.
0321154000092

DOSEN PEMBIMBING
Harmin Sulistiyaning Titah, ST., MT., Ph.D

Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, 2019



FINAL PROJECT - RE 184804

**TREATMENT OF BATIK INDUSTRY WASTEWATER USING
CHEMICAL COAGULATION AND WATER HYACINTH WITH
BIOAUGMENTATION USING *Pseudomonas aeruginosa***

Kita Pritasari A.
0321154000092

ADVISOR
Harmin Sulistiyaning Titah, ST., MT., Ph.D

Department of Environmental Engineering
Faculty of Civil Environmental and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, 2019

LEMBAR PENGESAHAN

**Pengolahan Air Limbah Industri Batik Menggunakan
Koagulasi Kimia dan Eceng Gondok dengan Bioaugmentasi
Menggunakan *Pseudomonas aeruginosa***

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik
pada**

**Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya**

Oleh:

**KITA PRITASARI ARUMDATI
NRP. 0321154000092**

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir



Harmin Sulistiyaning Titah, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19750523 200212 2 001



**PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI BATIK
MENGUNAKAN KOAGULASI KIMIA DAN ECENG GONDOK
DENGAN BIOAUGMENTASI MENGGUNAKAN *Pseudomonas
aeruginosa***

Nama Mahasiswa : Kita Pritasari Arumdati
NRP : 03211540000092
Departemen : Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing : Harmin Sulistyaning Titah, S.T., M.T.,
Ph.D.

ABSTRAK

Industri batik dalam skala *home-industry* semakin berkembang dan banyak ditemukan di seluruh Indonesia. Dengan pesatnya perkembangan industri batik, semakin banyak pula limbah tekstil yang dihasilkan. Salah satunya adalah limbah cair yang memiliki pencemar BOD, COD dan TSS yang tinggi serta mengandung berbagai macam pewarna. Zat warna dan pencemar organik tersebut dapat membahayakan lingkungan dan kesehatan manusia. Telah diterapkan berbagai metode untuk mengolah air limbah tekstil atau batik, salah satunya metode pengolahan kimiawi dengan proses koagulasi-flokulasi. Metode biologis juga dapat dilakukan melalui fitoremediasi atau remediasi dengan bakteri. Namun, secara terpisah, aplikasi berbagai metode tersebut menghasilkan efluen yang belum layak untuk dibuang ke badan air. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan efisiensi pengolahan air limbah batik oleh proses koagulasi-flokulasi dan pengaruh bioaugmentasi *Pseudomonas aeruginosa* terhadap efisiensi pengolahan dan morfologi eceng gondok.

Dilakukan uji pengolahan air limbah batik dengan proses koagulasi-flokulasi dan proses biologis. Proses koagulasi menggunakan koagulan alum dilakukan selama 1 menit diikuti flokulasi selama 20 menit dan sedimentasi selama 1 jam. Proses pengolahan biologis dilakukan oleh tumbuhan air *Eichhornia crassipes* (eceng gondok) yang diinteraksikan dengan bakteri

P.aeruginosa. Bioreaktor dioperasikan secara *batch* selama 7 hari. Parameter utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah BOD, COD, TSS, dan warna (absorbansi), dengan pH dan suhu sebagai parameter pendukung. Penelitian pendahuluan *jar test* dilakukan untuk menentukan dosis optimum alum dalam proses koagulasi-flokulasi dengan variasi dosis koagulan 500 - 2500 mg/L dan variasi kecepatan koagulasi 80 rpm dan 100 rpm. *Range finding test* dilakukan untuk mengetahui batas maksimum konsentrasi pencemar yang dapat diolah eceng gondok. Pada penelitian utama tahap pengolahan biologis, ditetapkan variasi konsentrasi *P. aeruginosa* dengan volume media biakan bakteri (yang memiliki nilai OD₆₀₀ > 0,6) sebanyak 5% dan 10% terhadap volume air limbah.

Air limbah diambil dari Kampung Batik Jetis, Sidoarjo dan memiliki nilai pH 9,63, konsentrasi COD 8660 mg/L, BOD 899,1 mg/L, dan TSS 2720 mg/L. Uji pendahuluan *jar test* menghasilkan dosis optimum koagulan alum sebesar 900 mg/L yang dapat menyisihkan COD, BOD, TSS, dan warna masing-masing sebanyak 94,1%, 92,2%, 99,6%, dan 96,3%. Sementara hasil pengolahan biologis menunjukkan bahwa sistem bioaugmentasi eceng gondok dengan *P. aeruginosa* lebih efektif pada konsentrasi bakteri 5% yang memiliki efisiensi penyisihan COD 9,8%, BOD 27,7%, TSS 60%, dan warna 61%. Sementara sistem bioreaktor dengan eceng gondok tanpa bioaugmentasi menghasilkan efisiensi penyisihan terbaik, yaitu COD 45,1%, BOD 53,6%, TSS 80%, dan warna 83%.

Kata Kunci: **Aluminium Sulfat, *Eichhornia crassipes*, Koagulasi, Limbah Industri Batik, *Pseudomonas aeruginosa*.**

TREATMENT OF BATIK INDUSTRY WASTEWATER USING CHEMICAL COAGULATION AND WATER HYACINTH WITH BIOAUGMENTATION USING *Pseudomonas aeruginosa*

Student Name : Kita Pritasari Arumdati
NRP : 03211540000092
Department : Environmental Engineering
Supervisor : Harmin Sulistyaning Titah, S.T., M.T.,
Ph.D.

ABSTRACT

Batik industry in a home-industry scale is growing and found throughout Indonesia. Rapid development of the batik industry leads to an increase in production of textile waste. One of those wastes is wastewater which contains high BOD, COD and TSS concentration as well as various kinds of dyes. These dyes and organic pollutants can harm the environment and damage human health. Various methods have been applied to treat textile or *batik* wastewater, one of which is a chemical method by coagulation-flocculation process. Biological methods can also be done through phytoremediation or bacterial remediation. However, separately, the application of these methods produces effluents that are not suitable to be discharged into water bodies. This study aims to determine the removal efficiency of *batik* wastewater treatment by coagulation-flocculation process and the effect of *Pseudomonas aeruginosa* bioaugmentation on the removal efficiency by water hyacinth as well as its morphology.

The study of *batik* wastewater treatment was carried out by coagulation-flocculation process and biological process. The coagulation process using alum as coagulant was carried out for 1 minute followed by flocculation for 20 minutes and sedimentation for 1 hour. The phytoremediation process is carried out by *Eichhornia crassipes* (water hyacinth) which is interacted with *P.aeruginosa*. The bioreactors are operated in a batch system for 7 days. The main parameters used in this study are BOD, COD,

TSS, and color (absorbance), with pH and temperature as supporting parameters. Preliminary study using jar test was conducted to determine the optimum dose of alum in the coagulation-flocculation process using coagulant dose variations of 500–2500 mg/L and coagulation speed variations of 80 rpm and 100 rpm. Then, a range finding test was conducted to determine the maximum limit of pollutant concentration that can be treated by water hyacinth. In the biological treatment stage, variations in the concentration of *P. aeruginosa* were determined, with the volume of bacterial culture media (which has OD₆₀₀ > 0.6) as much as 5% and 10% of the volume of wastewater.

Wastewater was taken from Kampung Batik Jetis, Sidoarjo and had a pH value of 9.63, concentrations of COD 8660 mg/L, BOD 899.1 mg/L, and TSS 2720 mg/L. The jar test preliminary study resulted in an optimum coagulant alum dosage of 900 mg/L which can remove COD, BOD, TSS, and color by 94.1%, 92.2%, 99.6%, and 96.3% respectively. Meanwhile, the results of biological treatment showed that the bioaugmented system of water hyacinth with *P. aeruginosa* was more effective at 5% bacterial concentration, which could remove 9.8% COD, 27.7% BOD, 60% TSS, and 61% color. On the other hand, the bioreactor system without bioaugmentation produced the best results, with removal efficiency of COD, BOD, TSS, and color reaching 45.1%, 53.6%, 80% and 83% respectively.

Keywords: **Aluminum Sulfate, *Eichhornia crassipes*,
Coagulation, Batik Wastewater,
*Pseudomonas aeruginosa***

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya ucapkan pada Allah SWT karena atas Rahmat dan karunia-Nya saya dapat menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul “Pengolahan Air Limbah Industri Batik Menggunakan Koagulasi Kimia dan Eceng Gondok Dengan Bioaugmentasi Menggunakan *Pseudomonas aeruginosa*”.

Atas bimbingan dan pengarahan yang telah diberikan hingga terselesaikannya laporan tugas akhir ini, saya menyampaikan terima kasih kepada,

1. Ibu Harmin Sulistyaning Titah, ST., MT., PhD selaku dosen pembimbing tugas akhir, terima kasih atas kesediaan, kesabaran, bimbingan dan ilmu yang diberikan
2. Ibu Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, MAppSc., Bapak Prof. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, MScES., dan Ibu Bieby Voijant Tangahu, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen pengarah tugas akhir. Terima kasih atas saran serta bimbingannya
3. Ibu Hurun In, Bapak Hadi Sutrisno dan Ibu Merri selaku laboran Teknik Lingkungan ITS yang senantiasa membantu dan memfasilitasi di laboratorium
4. Adinda, Khalda, Azary', Raya, Bara, Maulana, Yohanes, Joshua, Ramadhanu, Bagas, Meralda, Khonsa, dan Parama atas segala bantuan dan dukungan moril yang telah diberikan sehingga tugas akhir ini dapat terlaksana
5. Teman-teman Teknik Lingkungan ITS 2015 yang selalu memberikan semangat dalam melaksanakan tugas akhir.

Ucapan terima kasih dan rasa syukur paling dalam saya berikan untuk kedua orang tua saya, Harry Wibowo dan Nikensari Budiutami, dan adik saya, Iman-Budi, yang selalu memberikan dukungan dan doa untuk kelancaran tugas akhir ini.

Saya menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan laporan kemajuan tugas akhir ini. Oleh karena itu saya menerima saran agar penulisan laporan tugas akhir ini menjadi lebih baik.

Surabaya, Juni 2019

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Ruang Lingkup	4
1.5 Manfaat	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Karakteristik Air Limbah	7
2.2 Industri Batik Tulis	7
2.3 Karakteristik Air Limbah Batik	8
2.4 Biochemical Oxygen Demand (BOD)	11
2.5 Chemical Oxygen Demand (COD).....	11
2.6 Total Suspended Solids (TSS).....	12

2.7	Koagulasi-Flokulasi	12
2.8	Koagulan	13
2.9	Jar Test.....	15
2.10	Fitoremediasi	16
2.11	Fitotoksitas	18
2.11.1	Range Finding Test.....	18
2.11.2	Efek Akut.....	19
2.12	Bioaugmentasi.....	19
2.12.1	Mekanisme antara Mikroorganisme Dengan Tumbuhan	19
2.13	<i>Eicchornia crassipes</i>	20
2.14	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	22
2.15	Penelitian Terdahulu	23
BAB 3 METODE PENELITIAN.....		27
3.1	Umum	27
3.2	Kerangka Penelitian	28
3.3	Tahapan Penelitian	30
3.3.1	Survei Pendahuluan	30
3.3.2	Ide Penelitian	30
3.3.3	Studi Literatur	31
3.3.4	Persiapan Reaktor	31
3.3.5	Persiapan Media dan Bahan Penelitian	33
3.3.6	Pengambilan Air Limbah Industri Batik.....	35
3.3.7	Penelitian Pendahuluan.....	35
3.3.8	Penelitian Utama	38
3.4	Analisis Data.....	45
3.5	Kesimpulan dan Saran	45
BAB 4 ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....		47
4.1	Karakteristik Awal Air Limbah.....	47

4.2	Penelitian Pendahuluan	48
4.2.1	Tahap Propagasi	48
4.2.2	Tahap Aklimatisasi	50
4.2.3	Jar Test.....	50
4.2.4	Range Finding Test	63
4.3	Pengolahan Air Limbah Batik oleh Bioaugmentasi <i>E. crassipes</i> dengan <i>P. aeruginosa</i>	67
4.3.1	Analisis Parameter COD	69
4.3.2	Analisis Parameter BOD.....	71
4.3.3	Analisis Rasio BOD/COD	71
4.3.4	Analisis Parameter TSS	72
4.3.5	Analisis Parameter Warna.....	74
4.3.6	Analisis Parameter Suhu	75
4.3.7	Analisis Parameter pH.....	76
4.3.8	Analisis Morfologi Tumbuhan	77
4.3.9	Analisis Berat Basah dan Berat Kering	81
4.3.10	Analisis Colony Forming Unit (CFU)	82
BAB 5_KESIMPULAN		85
5.1	Kesimpulan.....	85
5.2	Saran.....	86
DAFTAR PUSTAKA		87
LAMPIRAN A.....		97
LAMPIRAN B.....		101
LAMPIRAN C		109
BIOGRAFI PENULIS.....		111

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penggolongan Zat Warna	9
Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu	23
Tabel 3.1 Baku Mutu Limbah Cair Industri Tekstil	31
Tabel 3.2 Penentuan Dosis Koagulan dan Kecepatan Pengadukan	39
Tabel 3.3 Variabel <i>Jar Test</i>	40
Tabel 3.4 Reaktor Biologis	40
Tabel 3.5 Parameter Penelitian dan Metode Uji	41
Tabel 4.1 Karakteristik Awal Air Limbah.....	47
Tabel 4.2. Hasil Uji Jar Test Aluminium Sulfat dengan 100 rpm.	51
Tabel 4.3 Hasil Uji Jar Test Aluminium Sulfat dengan 80 rpm.....	53
Tabel 4.4 Hasil Pengamatan Range Finding Test.....	64
Tabel 4.5 Perubahan Nilai BOD Pada Bioreaktor	71

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Eichhornia crassipes</i>	21
Gambar 2.2	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	22
Gambar 3.1	Kerangka Penelitian	30
Gambar 3.2	Reaktor Koagulasi-Flokulasi.....	32
Gambar 3.3	Reaktor Biologis	33
Gambar 3.4	Reaktor Propagasi <i>E. crassipes</i>	36
Gambar 3.5	Alat Jar Test	37
Gambar 3.6	Reaktor <i>Range Finding Test</i>	38
Gambar 4.1	Air Limbah Industri Batik	47
Gambar 4.2	Fase Generatif Eceng Gondok.....	48
Gambar 4.3	Pengukuran (a) lebar daun dan (b) panjang akar.....	49
Gambar 4.4	Laju Pertumbuhan Eceng Gondok	49
Gambar 4.5	Aklimatisasi Eceng Gondok.....	50
Gambar 4.6	Efisiensi Penyisihan COD, TSS dan Warna dengan 100 rpm	52
Gambar 4.7	Hasil Koagulasi-Flokulasi dengan 100 rpm	53
Gambar 4.8	Efisiensi Penyisihan COD, TSS, dan Warna dengan 80 rpm	54
Gambar 4.9	Hasil Koagulasi-Flokulasi dengan 80 rpm	55
Gambar 4.10	Konsentrasi COD Hasil Penyisihan Oleh Aluminium Sulfat	57
Gambar 4.11	Konsentrasi TSS Hasil Penyisihan Oleh Aluminium Sulfat	58
Gambar 4.12	Efisiensi Penyisihan COD Oleh Aluminium Sulfat	59
Gambar 4.13	Efisiensi Penyisihan TSS Oleh Aluminium Sulfat	59
Gambar 4.14	Efisiensi Penyisihan Warna Oleh Aluminium Sulfat	60
Gambar 4.15	Nilai pH Setelah Penambahan Koagulan Alum.....	61
Gambar 4.16	Nilai pH Setelah Uji Jar Test 100 rpm	62
Gambar 4.17	Hasil Pengamatan RFT Hari ke-1, ke-5, dan ke-7 dengan Variasi Konsentrasi COD	65
Gambar 4.18	Efek COD terhadap eceng gondok (kurva konsentrasi-respons)	66
Gambar 4.19	Diagram Alir Proses Koagulasi-Flokulasi	67

Gambar 4.20 Nilai COD Pada Bioreaktor.....	69
Gambar 4.21 Rasio BOD/COD Pada Bioreaktor.....	72
Gambar 4.22 Nilai TSS Pada Bioreaktor.....	73
Gambar 4.23 Nilai Absorbansi Terkait Warna Pada Bioreaktor	74
Gambar 4.24 Nilai Suhu Pada Bioreaktor	75
Gambar 4.25 Nilai pH Pada Bioreaktor	76
Gambar 4.26 (a-d) Perubahan Fisik Eceng Gondok	78
Gambar 4.27 Lebar Daun Eceng Gondok	79
Gambar 4.28 Panjang Tumbuhan Eceng Gondok	79
Gambar 4.29 Panjang Akar Eceng Gondok	80
Gambar 4.30 Berat Basah dan Berat Kering Tumbuhan	81
Gambar 4.31 Koloni <i>P. aeruginosa</i> pada Media Selektif.....	83
Gambar 4.32 Log CFU <i>P. aeruginosa</i> pada Bioreaktor	83

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perekonomian Indonesia berkembang seiring dengan perkembangan industri, salah satunya adalah industri tekstil. Salah satu jenis industri tekstil yang banyak ditemukan di Indonesia adalah industri tekstil batik. Namun, proses produksi industri tersebut menghasilkan produk sampingan berupa limbah. Salah satu limbah yang dihasilkan adalah limbah cair yang umumnya banyak mengandung bahan organik, logam berat serta berbau dan berwarna (Astirin dan Winarno, 2009).

Sumber utama penghasil limbah cair dalam industri batik adalah proses produksi yang meliputi proses pewarnaan, pencelupan, pencucian, dan pengemasan (Setyaningsih, 2007). Karakteristik limbah industri batik di antaranya adalah bersifat alkalis, berwarna, memiliki BOD, suhu, dan kadar *suspended solid*, yang tinggi (Kurniawan, 2013). Konsentrasi pewarna dan BOD yang tinggi pada air limbah dapat meracuni biota air yang ada di badan air (Hertiyani, 2016). Senyawa logam berat yang terdapat pada buangan industri batik berupa kromium (Cr), timbal (Pb), nikel (Ni), tembaga (Cu), dan mangan (Mn). Air limbah menjadi bersifat beracun dan dapat merusak struktur dan fungsi sel apabila dikonsumsi. Logam-logam berat tersebut akan menimbulkan masalah lingkungan karena tidak terurai (Muzamil, 2010).

Limbah cair tekstil batik dapat diolah dengan metode konvensional seperti *Anaerobic Baffled Reactor*, sistem lumpur aktif, bioremediasi, ozonasi, dan aerasi (Sitanggang, 2017). Meskipun air limbah tekstil dapat secara efektif diolah oleh *wet oxidation*, *advanced chemical oxidation*, dan adsorpsi dengan karbon aktif, biaya metode-metode tersebut relatif tinggi (Guendy, 2008). Koagulasi merupakan metode yang baik secara ekonomis untuk menghilangkan pewarna pada air limbah. Metode ini menambahkan koagulan seperti alum, fero sulfat atau feri klorida yang menyisihkan warna dengan baik (Robinson *et al.*, 2001). Nurlina *et al.* (2015) menggunakan alum sebagai koagulan dalam pengolahan limbah cair batik dengan dosis optimum 100 mg/L. Dosis tersebut dapat menyisihkan COD awal 2018,5 mg/L

sebanyak 57,43%. Selcuk (2005) juga mendapatkan penyisihan optimum alum sebesar 56% untuk COD dan 60% untuk warna dari nilai COD awal sebesar 1150 mg/L. Namun, hasil akhir konsentrasi pencemar dari efluen pengolahan tersebut belum memenuhi baku mutu.

Metode alternatif untuk pengolahan secara biologis dapat lebih menguntungkan dari metode konvensional (fisika dan kimiawi) karena lebih sederhana, murah, ramah lingkungan, dan tidak menghasilkan limbah sekunder (Azizah, 2008). Penyisihan pencemar organik dan dekolonisasi zat warna secara biologis dapat dilakukan dengan menggunakan jamur, ragi, alga, tumbuhan (fitoremediasi), dan bakteri. Proses fitoremediasi dapat menyerap, mengumpulkan dan mendegradasi bahan-bahan pencemar tertentu dalam limbah (Raissa dan Tangahu, 2017).

Beberapa penelitian telah dilakukan mengenai dekolonisasi oleh mikroorganisme seperti bakteri. Salah satunya adalah *Pseudomonas sp.* yang sering digunakan sebagai agen bioremediasi limbah pewarna dan logam berat (Shah, 2014). *Pseudomonas sp.* dapat menghilangkan pewarna tekstil *Rhodamin B* dan bewarna asidik seperti *nigrosine* dan *acid orange* (Valerie *et al.*, 2018). *P. aeruginosa* dalam suatu konsorsium bakteri dapat menyisihkan BOD sebanyak 76,86% dari konsentrasi awal 600,22 mg/l dan 172,41 mg/l (Maharani dan Wesen, 2017). Pada kultur campuran *P. aeruginosa* dan *B. subtilis*, limbah tekstil dengan COD 1200 mg/L dan BOD 750 mg/L dapat didegradasi sebanyak 83,0% dan 97,3% (Ajao *et al.*, 2011). Afzal *et al.* (2007) menemukan bahwa *P. aeruginosa* mampu menyisihkan COD dan BOD dari konsentrasi awal masing-masing 2032 dan 773 mg/l mencapai 69 dan 26 mg/l. Uji tersebut dilakukan dalam larutan fenol 1000 mg/L sebagai sumber karbon dan energi utama. Vijayalakshmi dan Muthukumar (2015) menemukan bahwa setelah aklimatisasi secara bertahap, *P. aeruginosa* dapat menyisihkan COD sebanyak 68% dengan konsentrasi awal COD air limbah tekstil 9333 mg/L, pada suhu 37°C dan pH 7.

Selain bakteri, tumbuhan seperti *E. crassipes* atau eceng gondok dapat digunakan untuk meremediasi air limbah. *E. crassipes* secara fitoremediasi mampu menyerap zat organik, zat anorganik serta logam berat yang merupakan bahan pencemar (Djo *et al.*, 2017). *E. crassipes* memiliki sifat hiper akumulator

sehingga mampu menyerap bahan terlarut dan tersuspensi dari air (Yuliani *et al.*, 2014). Djo *et al.* (2017) menemukan bahwa *E. crassipes* dapat menurunkan nilai COD sebanyak 20,7 mg/L dengan efektivitas 38,15%. Selain itu, Tan *et al.* (2016) menyatakan bahwa *E. crassipes* menyisihkan warna hingga 98,42%. Rachmawati (2008) menguji kemampuan *E. crassipes* dalam mengolah limbah industri pencelupan benang. Ditemukan efisiensi penyisihan COD 45%, BOD 53,3% dan TSS 67,89% dengan konsentrasi efluen masing-masing 220 mg/L, 74,73 mg/L dan 149 mg/l.

Rofifah (2018) menemukan penyisihan bioaugmentasi *P. aeruginosa* dan *E. crassipes* terhadap warna limbah tekstil mencapai 34% dengan efisiensi hingga 74%. Namun belum diketahui kemampuan bio-augmentasi tersebut dalam penyisihan BOD dan COD pada air limbah tekstil. Air limbah yang berasal langsung dari proses produksi batik memiliki kadar BOD dan COD yang sangat tinggi sehingga tidak dapat diolah langsung oleh tumbuhan dan bakteri. Menurut Guendy (2008), pada saat ini, air limbah industri tekstil umumnya diolah menggunakan kombinasi proses biologis dan koagulasi. Sebelum diolah pada unit pengolahan biologis, koagulasi dapat mengurangi pencemar air limbah tersebut. Oleh karena itu, penelitian ini akan menggunakan penggabungan metode koagulasi-flokulasi dengan pengolahan biologis dalam pengolahan limbah cair batik. Untuk koagulasi digunakan alum sebagai koagulan. Sementara itu, untuk pengolahan biologis digunakan bioaugmentasi tumbuhan air *E. crassipes* dengan *P. aeruginosa*. Serangkaian reaktor tersebut akan dialirkan air limbah tekstil dari proses pembuatan batik. Cara tersebut dapat digunakan untuk menganalisis pengaruh proses koagulasi-flokulasi dan bioaugmentasi tumbuhan terhadap nilai efisiensi penyisihan BOD, COD, TSS dan pewarna.

1.2 Rumusan Masalah

Efluen dari penyisihan BOD dan COD limbah cair batik oleh proses koagulasi-flokulasi belum memenuhi baku mutu (Nurlina *et al.*, 2015; Selcuk, 2005). Sementara itu efisiensi penyisihan BOD, COD dan TSS oleh bioaugmentasi tumbuhan *E. crassipes* dengan bakteri *P. aeruginosa* belum diketahui (Rofifah, 2018). Perlu ditentukan efisiensi penyisihan oleh koagulasi serta bioaugmentasi

E. crassipes dengan *P. aeruginosa* terhadap nilai BOD, COD, TSS, dan warna.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menentukan efisiensi penyisihan BOD, COD, TSS dan warna limbah cair batik oleh proses koagulasi dan flokulasi
2. Menentukan efisiensi penyisihan BOD, COD, TSS dan warna limbah cair batik oleh kombinasi proses koagulasi-flokulasi dan fitoremediasi oleh eceng gondok dengan bioaugmentasi menggunakan bakteri *P. aeruginosa*.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penelitian dalam tugas akhir ini adalah:

1. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium.
2. Penelitian dilakukan di Laboratorium Remediasi Lingkungan, Laboratorium Teknik Pengolahan Air, dan Laboratorium Limbah Padat dan B3 Teknik Lingkungan ITS.
3. Penelitian pendahuluan berupa tahap propagasi, tahap aklimatisasi, *jar test*, dan *range finding test*
4. Variabel yang digunakan adalah konsentrasi dosis koagulan, kecepatan pengadukan koagulasi, dan konsentrasi bakteri *P. aeruginosa* yang diinteraksikan dengan tumbuhan air eceng gondok
5. Parameter utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah konsentrasi warna, BOD, COD, dan TSS.

1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari perencanaan ini adalah:

1. Menyediakan informasi ilmiah untuk alternatif pengolahan limbah cair produksi batik secara kimiawi dan biologis.
2. Menyediakan informasi ilmiah terkait penyisihan kandungan BOD, COD, TSS dan warna pada media air.

3. Menyediakan informasi ilmiah terkait koagulasi dengan alum.
4. Menyediakan informasi ilmiah terkait bioremediasi menggunakan bakteri dan tumbuhan, khususnya bakteri *P. aeruginosa* dan *E. crassipes*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Air Limbah

Limbah cair merupakan pencampuran air dan bahan pencemar yang terbawa oleh air. Bahan pencemar tersebut dapat ditemukan dalam keadaan terlarut maupun suspensi yang terbuang dari sumber domestik dan sumber industri. Limbah cair akan bercampur dengan air tanah, air permukaan, ataupun air hujan (Soeparman dalam Hertiyani, 2016).

Menurut Gutamang (2007), karakteristik air limbah dapat ditentukan dari tiga jenis sifat kandungannya yaitu:

- a) Sifat fisik
Jumlah padatan terlarut, padatan tersuspensi, padatan total, alkalinitas, kekeruhan, warna, salinitas, daya hantar listrik, bau, dan temperature merupakan ciri-ciri yang menentukan sifat fisik air limbah.
- b) Sifat kimia
Sifat kimia air limbah ditentukan berdasarkan nilai BOD, COD dan jumlah logam berat yang terkandung dalam air limbah.
- c) Sifat biologis
Kandungan bahan organik dalam air limbah terdiri dari senyawa yang beragam. Selain bahan organik, dalam air limbah terdapat kandungan bahan anorganik yang berbahaya ataupun beracun.

2.2 Industri Batik Tulis

Proses produksi dalam industri batik meliputi persiapan, pelekatan lilin, pewarnaan, pelorotan atau pencelupan, dan pencucian. Proses produksi yang menjadi sumber utama penghasil limbah adalah proses pewarnaan, pencelupan, dan pencucian (Hertiyani, 2016).

Tahap awal dalam pembuatan batik adalah penempelan bahan perintang pada lembar kain. Malam batik dibubuhkan pada lembar kain menggunakan canting, kemudian dituliskan dengan menggunakan kuas atau dicapkan dengan menggunakan cap logam. Warna dalam batik dihasilkan dari proses peresapan zat

warna ke dalam serat-serat benang. Pewarnaan dilakukan dengan metode colek atau peleburan dengan kuas, namun metode paling umum adalah pencelupan. Setelah pewarnaan selesai, pekerjaan selanjutnya adalah menghilangkan lilin dengan perebusan pada air mendidih sampai bersih (Alamsyah, 2018).

2.3 Karakteristik Air Limbah Batik

Pada umumnya, air limbah batik bersifat basa dan memiliki kadar organik yang tinggi. Proses pencelupan yang dilakukan merupakan penyumbang zat warna yang kuat apabila tidak diberikannya pengolahan yang tepat (Afifah dan Mangkoedihardjo, 2018). Limbah cair yang dihasilkan dari proses pengolahan kain dan pewarnaan mengandung zat-zat kimia yang dapat menyebabkan meningkatnya COD dan warna air limbah. Sedangkan pada kegiatan pelorotan, limbah cair yang dihasilkan memberikan kontribusi meningkatnya BOD air limbah (Sembiring dalam Hertiyani, 2016).

Pelepasan air limbah tersebut ke badan air tanpa melalui proses pengolahan dapat merusak ekosistem badan air penerima dan meracuni organisme air. Pada badan air, zat pewarna dapat menghambat berjalannya proses fotosintesis akibat menghalangi sinar matahari dan menimbulkan kondisi anaerobik pada badan air (Robinson *et al.*, 2001). Selain itu, beberapa jenis pewarna diduga bersifat karsinogen dan dapat membahayakan kesehatan manusia. Proses pencelupan atau pewarnaan kain batik umumnya menyumbang warna yang kuat, namun hanya sebagian kecil limbah organik. Sementara itu proses persiapan atau penganjiran menyumbang zat organik yang mengandung banyak zat padat tersuspensi (Laksono, 2012). Maka dari itu diperlukan pengolahan limbah cair untuk menyisahkan zat pewarna pada limbah tekstil (dekolorisasi).

Limbah cair dari proses industri batik cetak memiliki karakteristik berwarna keruh, berbusa, pH tinggi (senilai 9,7), konsentrasi BOD tinggi (129,47 mg/L), serta mengandung zat warna dimana di dalamnya terdapat logam berat (Muljadi dalam Hertiyani, 2016). Limbah batik juga mengandung TSS dan COD yang tinggi. Berdasarkan penelitian Pramudita dan Tangahu (2014), limbah batik di Jetis, Sidoarjo, pada akhir proses pembuatannya memiliki konsentrasi COD sebesar 3176 mg/L dan

TSS sebesar 132 mg/L. Pada penelitian Rosydiena *et al.* (2015), kandungan TSS pada air limbah UKM Batik Tulis Amali CH Sidoarjo mencapai 3287,33 mg/L. Rasio BOD/COD pada efluen air limbah batik cenderung rendah. Rochma (2017) menemukan air limbah batik di Sidoarjo memiliki kandungan COD 16654,8 mg/L dan BOD 1777,5 mg/L, dimana rasio BOD/COD adalah 0,106.

Zat warna yang terkandung dalam air limbah batik sulit untuk didegradasi dengan baik. Hal ini dikarenakan zat warna yang memiliki tingkatan kimia yang tinggi untuk menahan kerusakan akibat oksidasi dari cahaya matahari (Afifah dan Mangkoedihardjo, 2018).

Zat warna tekstil diklasifikasikan menjadi 2 (dua) yaitu:

1. Zat warna sintetis

Zat pewarna sintetis adalah zat buatan dari bahan kimia. Warna sintesis dapat digunakan dalam suhu yang tidak merusak lilin. Beberapa contoh pewarna sintetis adalah indigosol, naphtol, rapid, basis, indanthreen, procion, dan lain-lain (Pringgenies dalam Alamsyah, 2018).

2. Zat warna alami

Pewarna alami diperoleh dari alam baik secara langsung maupun tidak langsung. Bahan pewarna alam yang bisa digunakan dapat diambil pada tumbuhan di bagian daun, buah, kulit kayu ataupun bunga (Daranidra, 2010). Zat pewarna alami juga dapat diperoleh dari hewan (*lac dyes*). Beberapa contoh warna alami adalah tanaman tingi, jambal, tegeran, mahoni dan lain-lain (Alamsyah, 2018).

Menurut Zille (2005), zat warna juga dapat digolongkan berdasarkan sifat dan cara pencelupannya. Penggolongan ini dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Penggolongan Zat Warna

Golongan Zat Warna	Sifat
Zat warna <i>direct</i>	Mempunyai daya ikat dengan serat selulosa, pencelupan dilakukan secara langsung dalam larutan

Golongan Zat Warna	Sifat
	dengan zat-zat tambahan yang sesuai.
Zat warna <i>mordant</i>	Mempunyai daya ikat yang lemah dengan serat. Pada proses pencelupan biasanya dilakukan dengan penambahan krom pada zat warna sehingga membentuk kompleks logam.
Zat warna <i>reactive</i>	Mempunyai gugus reaktif yang dapat membentuk ikatan kovalen kuat dengan serat selulosa, protein, poliamida dan polyester, dilakukan pada suhu rendah dan tinggi.
Zat warna penguat	Mempunyai daya ikat yang kuat dengan serat selulosa, warna terbentuk dalam serat setelah ditambahkan garam penguatnya.
Zat warna asam	Memiliki daya ikat yang kuat dengan serat protein dan poliamida. Pencelupan dilakukan pada kondisi asam dan secara langsung ditambahkan pada serat.
Zat warna basa	Memiliki daya ikat yang kuat dengan serat protein. Pencelupan dilakukan pada kondisi basa dan secara langsung ditambahkan pada serat.
Zat warna belerang	Memiliki daya ikat yang kuat dengan serat selulosa. Pada gugus sampingnya mengandung belerang yang mampu berikatan kuat dengan serat.

2.4 **Biochemical Oxygen Demand (BOD)**

Biochemical oxygen demand atau BOD adalah suatu karakteristik yang menunjukkan jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan oleh mikroorganisme (umumnya bakteri) untuk mengurai atau mendekomposisi bahan organik dalam kondisi aerobik (Metcalf & Eddy, 2003). BOD diukur sebagai oksigen terpakai dalam inkubasi kedap udara dari sampel. Uji kadar BOD berjalan selama beberapa hari, dan hasilnya dapat dikatakan sebagai BOD₅ (Kadlec dan Wallace, 2009).

Pada awalnya, mikroorganisme menggunakan bahan organik secara cepat untuk metabolisme dan pembetulan sel. Hal ini menyebabkan peningkatan BOD dalam 1-3 hari. Kebutuhan oksigen akan turun setelah bahan organik dicerna. Reaksi biologis pada tes BOD dilakukan pada temperatur inkubasi 20°C dan dilakukan selama 5 hari, mengingat bahwa dengan waktu tersebut sebanyak 60-70% kebutuhan terbaik karbon dapat tercapai, hingga mempunyai istilah BOD₅. Semakin banyak kebutuhan oksigen yang dibutuhkan bakteri untuk mengurai zat organik, semakin tinggi pula nilai BOD (Sudrajat, 2004).

2.5 **Chemical Oxygen Demand (COD)**

Parameter COD digunakan untuk mengukur senyawa organik terkandung dalam air limbah. COD atau *chemical oxygen demand* adalah jumlah oksidator kimia (biasanya senyawa kalium dikromat) yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa organik. Hasil pengukuran COD lebih besar daripada BOD dikarenakan oksidan yang kuat menyerang kelompok senyawa yang lebih besar. Konsumsi oksigen atau oksidan dapat diukur sebelum atau sesudah proses filtrasi sehingga didapatkan nilai BOD dan COD total dan terlarut (Kadlec dan Wallace, 2009).

Metode analisa COD menggunakan metode refluks terbuka dengan perhitungan secara teoritis. Zat-zat yang dapat dioksidasi oleh analisa COD adalah: zat organik *biodegradable*, selulosa, nitrogen organik *biodegradable* atau *non-biodegradable*, dan hydrogen aromatic. Analisa COD dapat digunakan dalam analisis limbah industri, identifikasi toksisitas suatu sampel air, dan identifikasi keberadaan substansi organik dalam sampel air (Rochma, 2017).

2.6 **Total Suspended Solids (TSS)**

Parameter TSS menunjukkan jumlah zat padat tersuspensi pada air. Pada air limbah, keberadaan TSS menyebabkan kekeruhan dan warna. Apabila air limbah dibuang ke badan air tanpa pengolahan, TSS dapat mengendap dan menjadi deposit lumpur. Kekeruhan yang disebabkan oleh TSS dapat mengganggu fotosintesis tumbuhan di dasar air karena menghambat penetrasi cahaya matahari ke dalam air. Saat penyaringan, TSS adalah padatan yang tertahan pada kertas saring. (Metcalf & Eddy, 2014). Cairan yang lolos disebut filtrat dan mengandung zat padat terlarut (TDS). TSS terbagi jadi dua yaitu TSS organik dan TSS anorganik. Keberadaan TSS organik juga menjadi penyebab turunnya kandungan oksigen air. Kandungan TSS dalam air dapat diketahui melalui analisis gravimetri.

2.7 **Koagulasi-Flokulasi**

Koagulasi adalah proses destabilisasi partikel koloid agar terjadi peningkatan ukuran partikel akibat tumbukan antar partikel. Partikel koloid pada air limbah memiliki muatan negatif pada permulaannya. Ukuran koloid tersebut ($0,001 - 0,1 \mu\text{m}$) menyebabkan gaya tarik antar partikel jauh lebih lemah daripada gaya tolak dari muatan elektrik partikel tersebut (Metcalf & Eddy, 2014). Koagulasi terjadi akibat pengadukan cepat dan pembubuhan koagulan pada air agar homogen. Ion-ion yang berasal dari koagulan tersebut memiliki muatan yang berlawanan dengan muatan partikel koloid. Muatan yang berlainan tersebut menyebabkan ketidakstabilan pada partikel koloid (Sianita dan Nurhayati, 2009). Proses koagulasi menetralkan muatan-muatan yang ada pada permukaan partikel dengan bantuan koagulan. Sementara itu, proses flokulasi membuat partikel-partikel tersebut mendekat dan membentuk flok melalui pengadukan lambat (Bidhendi *et al.*, 2007).

Flokulasi sendiri adalah proses dimana ukuran partikel dalam air membesar akibat tumbukan partikel. Tujuan flokulasi adalah untuk mengumpulkan partikel-partikel agar menghasilkan flok yang dapat dipisahkan dengan pengendapan atau filtrasi. Terdapat dua jenis flokulasi, yaitu mikroflokulasi dan makro flokulasi. Pada mikroflokulasi atau flokulasi *perikinetic*, partikel

terkumpul karena molekul-molekul dalam air bergerak secara acak atau disebut sebagai *Brownian motion*. Pada makroflokulasi atau flokulasi *orthokinetic* terkumpulnya partikel disebabkan oleh timbulnya gradien kecepatan dan pengadukan dalam air. Bentuk lain dari makroflokulasi disebabkan oleh perbedaan laju pengendapan dimana partikel berukuran besar mendekati partikel-partikel kecil dan membentuk partikel yang lebih besar (Metcalf & Eddy, 2014). Menurut Sianita dan Nurchayati (2009), efektifitas tumbukan yang terjadi dalam pembentukan flok dari partikel-partikel koloid ditentukan oleh kontak yang terjadi akibat:

- a. Adanya gerak termal
- b. Pengadukan
- c. Perbedaan kecepatan pengendapan masing-masing partikel

Secara garis besar proses koagulasi-flokulasi terdiri dari empat tahap, yaitu destabilisasi partikel koloid, pembentukan partikel koloid, penggabungan mikro flok, dan pembentukan makro flok.

Koagulasi dan flokulasi diikuti oleh proses pengendapan untuk menyisihkan flok yang terbentuk dari air limbah. Merancang proses koagulasi dan flokulasi membutuhkan percobaan terhadap dosis koagulan yang optimum untuk mendapatkan penyisihan flok maksimum (Bidhendi *et al.*, 2007). Faktor-faktor yang mempengaruhi proses koagulasi-flokulasi adalah:

- a. Kualitas dan kekeruhan air
- b. Temperatur air
- c. Jenis dan dosis koagulan
- d. pH dan alkalinitas air
- e. Jumlah garam yang terlarut dalam air
- f. Kecepatan pengadukan
- g. Waktu pengadukan

2.8 Koagulan

Koagulan adalah zat kimia yang ditambahkan untuk mendestabilisasi partikel koloid dalam air limbah agar terjadi pembentukan flok. Koagulan umumnya berupa polimer alami dan sintetik (organik), garam logam seperti alum atau feri klorida, dan garam logam yang terhidrolisis seperti polialuminium klorida (PAC)

(Metcalf & Eddy, 2014). Menurut Bidhendi *et al.* (2007), koagulan dapat diklasifikasikan kedalam dua jenis, yaitu:

a. Koagulan inorganik

Beberapa koagulan inorganik yang dapat digunakan adalah alum, magnesium klorida, besi (II) sulfat, besi (III) klorida, besi (III) sulfat, dan kapur. Koagulan inorganik efektif secara biaya dan dapat diaplikasikan untuk berbagai jenis air dan air limbah. Setelah ditambahkan pada air, koagulan inorganik akan membentuk presipitat aluminium atau besi yang menarik pencemar untuk membentuk flok. Salah satu kekurangan dari koagulan tersebut adalah volume *sludge* yang dihasilkan dan harus dibuang lebih banyak.

b. Koagulan organik

Koagulan organik seperti polielektrolit, polimer sintesis, dan polimer alami dapat digunakan dalam proses koagulasi. Polielektrolit adalah polimer dengan monomer inti seperti karboksilat dan amino. Kelebihan dari koagulan organik adalah kebutuhan dosis rendah, produksi *sludge* lebih sedikit, dan tidak berpengaruh pada pH.

Beberapa jenis koagulan yang dapat digunakan untuk mengolah air limbah industri tekstil atau batik adalah sebagai berikut:

a. Aluminium sulfat

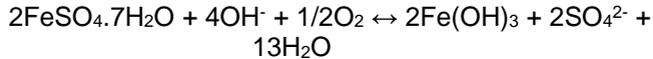
Aluminium sulfat atau alum memiliki rumus kimia $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ dan dapat berbentuk *granular*, serbuk, atau cair. Menurut Selcuk (2005), ketika alum ditambahkan pada air atau air limbah, terjadi presipitasi $\text{Al}(\text{OH})_3$ dengan rumus berikut:



Penambahan alum dengan konsentrasi lebih tinggi menyebabkan pH larutan semakin turun. Hal ini disebabkan oleh pembentukan ion H^+ setelah alum bereaksi dengan air dan Al terhidrolisis (Nurlina *et al.*, 2015). Pada suatu penelitian ditemukan bahwa pH optimum alum pada dosis 400 mg/L dan produksi lumpur terendah adalah 8,2 (Bidhendi *et al.*, 2007).

b. Besi (II) sulfat

Besi (II) sulfat atau disebut juga ferro sulfat memiliki rumus kimia $2\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Reaksi pada proses koagulasi dengan ferro sulfat berlangsung dengan rumus berikut:



Koagulasi dengan ferro sulfat berlangsung baik pada pH optimum 9,5 (Selcuk, 2005). Saat proses koagulasi, FeSO_4 terhidrolisis dan menghasilkan hidroksida berbentuk gel serta mononuklir dan polinuklir bermuatan positif. Senyawa bermuatan positif bergabung dengan partikel koloid bermuatan negatif dalam air limbah. Pada saat pengendapan hidroksida-hidroksida tersebut menarik partikel koloid netral atau bermuatan yang tersisa dan membentuk presipitat (Parmar, *et al.* 2011).

c. Besi (III) klorida

Ion besi (Fe^{3+}) bersifat serupa dengan ion aluminium (Al^{3+}). Besi (III) klorida atau disebut juga ferri klorida memiliki rumus kimia $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. FeCl_3 adalah garam besi yang berasal dari asam kuat dan basa lemah. Sifat asam yang dimiliki menyebabkan penurunan pH apabila dilarutkan dalam air (Norjannah, 2015). Reaksi ferri klorida dalam proses koagulasi adalah sebagai berikut:



Koagulasi dengan ferri klorida berlangsung dengan baik pada pH 4 hingga 12. Koagulan ferri klorida cocok untuk air dengan kesadahan rendah dan intensitas warna yang tinggi dan memiliki rentang kondisi pH optimum yang lebih luas dari alum. Selain itu, koagulan senyawa besi membentuk flok yang lebih kuat dibandingkan dengan flok hasil koagulasi dengan alum (Sayuti, 2015).

2.9 Jar Test

Jar test adalah serangkaian metode uji untuk mengevaluasi proses koagulasi dan floklasi untuk menentukan dosis optimum koagulan. Penambahan bahan kimia pada pengolahan air bersih atau air limbah tidak dapat dilakukan dengan sembarang. Perlu ditentukan dosis yang tepat dan bahan kimia yang cocok. Tujuan

jar test diantaranya adalah untuk mengevaluasi kinerja koagulan, menentukan dosis optimum koagulan, dan mencari pH optimum (Ridianto, 2007). Selain parameter-parameter tersebut ditentukan pula waktu dan intensitas pengadukan cepat dan pengadukan lambat, serta waktu penjernihan atau pengendapan (Margaretha *et al.*, 2012).

2.10 Fitoremediasi

Fitoremediasi adalah upaya penggunaan tanaman untuk dekontaminasi limbah. Dalam proses fitoremediasi, tanaman menyerap polutan organik melalui akarnya. Selanjutnya, senyawa organik yang diserap akan masuk ke batang melalui pembuluh pengangkut dan menyebar ke seluruh bagian tanaman. Senyawa organik kemudian akan mengalami reaksi biologis dan terakumulasi di batang tanaman untuk diteruskan ke daun (Djo *et al.*, 2017)

Dalam fitoproses terdapat proses fisika, kimia, dan biologis yang membantu penyerapan, degradasi, dan metabolisme kontaminan, baik oleh tanaman maupun organisme yang hidup bebas di rizhosfer. Khususnya pada tumbuhan air, proses pertumbuhan dan adaptasi terhadap kondisi lingkungan tercemar berlangsung dengan cepat (Afifah dan Mangkoedihardjo, 2018).

Saat tumbuhan menyerap pencemar dari air, rizhosfer menjadi tempat terikatnya mikroorganisme yang berperan dalam mengolah air. Perbedaan jenis makrofit pada tumbuhan menyebabkan efisiensi penyisihan beban pencemar yang berbeda karena panjang akar serta sistem perakaran yang beragam. Tumbuhan air terdiri dari empat jenis berdasarkan fase hidupnya, yaitu *free floating*, *floating leaved*, *rooted emergent*, dan *submerged macrophytes* (Brix dan Schierup, 1989).

Menurut Pivetz (2001) proses fitoremediasi terbagi oleh 6 tahap, yaitu:

1. Fitoekstraksi adalah proses penyisihan kontaminan. Dalam proses ini, kontaminan diserap oleh akar yang kemudian terakumulasi di bagian tumbuhan yang berada di atas tanah. Selanjutnya, kontaminan dipanen dan dibuang oleh biomassa tumbuhan. Studi menunjukkan akumulasi kontaminan organik yang tidak berubah di dalam bagian tumbuhan di

atas tanah. Fitoekstraksi juga dikenal sebagai fitoakumulasi dan fitoabsorpsi.

2. Fitostabilisasi adalah penggunaan vegetasi untuk menampung kontaminan dalam tanah secara *in situ*. Proses ini dilakukan melalui modifikasi kondisi kimia, biologis dan fisik di dalam tanah. Transportasi kontaminan dapat dikurangi melalui penyerapan dan akumulasi oleh akar, adsorpsi ke akar pengendapan, dan kompleksasi. Selain itu, dapat terjadi pengurangan valensi logam di tanah dalam zona akar atau mengikat ke dalam materi humus (organik) melalui proses humifikasi.
3. Rhizofiltrasi (atau fitofiltrasi) adalah penyisihan kontaminan dalam permukaan air, air limbah atau air tanah ekstraksi oleh akar tumbuhan. Proses ini terjadi melalui adsorpsi dan presipitasi pada akar, atau absorpsi ke dalam akar. Kontaminan tetap tinggal pada akar, di dalam akar, atau diambil dan ditranslokasi ke bagian tumbuhan lain.
4. Rhizodegradasi adalah peningkatan biodegradasi dalam tanah secara alamiah melalui pengaruh akar tumbuhan. Proses ini akan menyebabkan kerusakan atau detoksifikasi kontaminan organik. Kontaminan organik dalam tanah dapat dipecah menjadi produk yang lebih kecil atau sepenuhnya termineralisasi ke produk anorganik. Mineralisasi dilakukan oleh bakteri, fungi, dan *actinomycetes* menghasilkan produk anorganik seperti CO₂ dan air.
5. Fitodegradasi adalah penyerapan, metabolisme, dan degradasi kontaminan dalam tumbuhan oleh enzim yang diproduksi oleh tumbuhan. Degradasi juga dapat terjadi di tanah, sedimen, lumpur, air tanah, atau air permukaan. Fitodegradasi tidak bergantung pada mikroorganisme yang terkait dengan rhizosphere. Kontaminan yang dapat melalui fitodegradasi adalah senyawa organik, herbisida dan insektisida, serta nutrisi anorganik.

6. Fitovolatilisasi adalah pengambilan kontaminan diikuti oleh pelepasan kontaminan volatil, produk degradasi kontaminan volatil, atau bentuk volatil dari kontaminan non-volatil. Dalam menyisihkan kontaminan, terjadi transfer kontaminan dari medium awal (air tanah) ke atmosfer. Proses metabolisme di dalam tumbuhan dapat mengubah bentuk kontaminan menjadi bentuk yang kurang beracun.

2.11 Fitotoksisitas

Fitotoksisitas adalah potensi suatu senyawa atau zat dalam menyebabkan kerusakan sementara atau jangka panjang terhadap tumbuhan (EPPO, 2007). Zat-zat kimia yang berada dalam lingkungan tumbuhan dan dapat terserap ke dalam tumbuhan melalui akar atau daun dapat mengakibatkan efek negatif bagi tumbuhan. Efek negatif muncul apabila tumbuhan terpapar oleh zat tersebut dalam jumlah dan waktu tertentu. Beberapa contoh efek negatif tersebut adalah kerusakan pada struktur tumbuhan dan fungsi tumbuhan (Mangkoedihardjo dan Samudro, 2009).

Efek fitotoksisitas dapat diamati pada tumbuhan saat ia muncul, selama proses pertumbuhan, atau dapat pula dinyatakan saat panen. Efek tersebut dapat bersifat sementara atau permanen. Gejala-gejala yang muncul dapat mempengaruhi keseluruhan tumbuhan, atau hanya suatu bagian seperti pada akar, batang, daun, bunga, atau buah (EPPO, 2007). Menurut Hoffman dalam Purwanti *et al.* (2012), selama uji fitotoksisitas, parameter tumbuhan yang harus dianalisis adalah berat basah, perubahan panjang batang atau akar sepanjang periode uji, atau observasi fisik seperti daun yang menguning atau menciut.

2.11.1 Range Finding Test

Range finding test (RFT) merupakan uji pendahuluan sebelum proses fitoremediasi dilaksanakan. RFT dilakukan untuk menentukan konsentrasi maksimum kontaminan dimana tumbuhan atau organisme lain dapat bertahan hidup (Obenu *et al.*, 2018). Dalam proses uji toksisitas zat, RFT dilakukan untuk mengetahui pada rentang konsentrasi berapa biota memberikan

respons. Rentang konsentrasi zat adalah rentang lebar berupa rentang dalam konsentrasi zat (mg/L) atau pengenceran (%) yang telah ditentukan (Mangkoedihardjo dan Samudro, 2009). RFT pada umumnya dilaksanakan pada 5 level konsentrasi yang berbeda untuk menentukan rasio konsentrasi terhadap respons kematian biota (Titah *et al.*, 2012).

2.11.2 Efek Akut

Respons biologis yang dihasilkan akibat pemaparan zat diklasifikasi sebagai efek akut atau efek kronis dan subkronis. Zat dinilai sebagai toksikan akut apabila secara langsung membunuh 50% atau lebih populasi biota yang terpapar dalam waktu pendek (96 jam – 14 hari) (Mangkoedihardjo dan Samudro, 2009). Konsentrasi toksikan yang menyebabkan kematian lebih dari 50% populasi biasa disebut LC_{50} (lethal concentration). Parameter pengukuran pada uji efek akut adalah jumlah kematian biota (LC_{50}) atau pengaruh terhadap pertumbuhan tanaman (EC_{50}). EC_{50} (effect concentration) adalah konsentrasi toksikan yang memberikan dampak terhadap 50% dari jumlah biota uji.

2.12 Bioaugmentasi

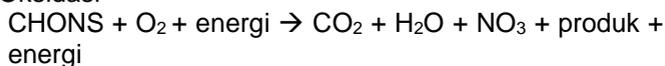
Bioaugmentasi adalah penambahan mikroorganisme yang memiliki kemampuan untuk melakukan biodegradasi terhadap molekul-molekul yang sulit terdegradasi dalam lingkungan. Pendekatan pengolahan ini memiliki biaya yang murah dan lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan pengolahan fisik-kimia (Nzila *et al.*, 2016). Proses saat dilakukan bioaugmentasi sama halnya dengan bioremediasi, dimana polutan tidak disimpan dan dikumpulkan saja, namun terjadi aktivitas mikrobiologis yang terstruktur untuk mengubah atau menghancurkan kontaminan ke dalam senyawa yang kurang atau tidak beracun (Abatenh *et al.*, 2017).

2.12.1 Mekanisme antara Mikroorganisme Dengan Tumbuhan

Pengolahan limbah dengan mikroorganisme atau bioremediasi terjadi sehingga terbentuk enzim yang mengubah struktur kimia polutan. Hal tersebut membuat limbah relatif tidak

berbahaya bagi lingkungan (Sitanggang, 2017). Berdasarkan penelitian Setiadi *et al.* (1999), terdapat kerjasama antara tumbuhan dengan mikroorganisme dalam proses penurunan konsentrasi pencemar dalam air limbah dengan tanaman air. Mikroorganisme dalam hal ini adalah yang berasosiasi dengan tumbuhan tersebut. Pada awalnya, air limbah teroksidasi dan melepaskan energi yang digunakan oleh mikroorganisme untuk mempertahankan dan membentuk sel baru. Limbah organik mengandung CHONS (karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen dan sulfur) dan serat sel dalam bentuk $C_5H_7NO_2$. Reaksi yang terjadi adalah:

a. Oksidasi



b. Pembentukan senyawa



Mikroorganisme mengalami fase pertumbuhan dimana terjadi peningkatan jumlah sel, atau disebut sebagai fase eksponensial. Pada fase tersebut, jumlah mikroorganisme mencapai jumlah maksimal. Maka dari itu, limbah organik dapat didegradasi dengan maksimal (Suyasa, 2015). Jenis bakteri yang umum digunakan dalam mengolah air limbah adalah bakteri gram negatif heterotrofik seperti *Zooglea*, *Pseudomonas* dan *Chromobacter*, atau bakteri filamentous seperti *Sphaerotilus* (Sitanggang, 2017).

2.13 *Eicchornia crassipes*

E. crassipes atau dikenal sebagai eceng gondok merupakan gulma air karena pertumbuhannya yang begitu cepat dan dapat menutupi permukaan air. Hal ini dapat menimbulkan masalah pada lingkungan, namun eceng gondok juga bermanfaat karena mampu menyerap bahan pencemar. Bahan pencemar yang dapat diserap diantaranya adalah zat organik, zat anorganik, dan logam berat (Djo *et al.*, 2017)



Gambar 2.1 *Eichhornia crassipes*

Sumber: Anonim (2018)

Bibit *E. crassipes* membutuhkan habitat air yang dangkal dan hangat serta intensitas cahaya tinggi. Akar berserat terbentuk dari batang pada dasar daun, sementara daun-daun terus tumbuh dari pusat tunas (*rosette*). Daun yang bercabang cenderung memanjang daripada berbentuk bulat. Daun dan batang dengan bentuk membulat mengisi sisi luar dari tumbuhan yang terdekat dengan air. Produksi daun terjadi secara teratur dengan daun tua berada pada sisi luar tumbuhan. Daun pada bagian tengah tumbuhan hampir vertikal, namun daun lateral semakin membungkuk ke arah luar. Dalam kondisi temperatur hangat dan stabil, rasio antara akar, batang dan daun tumbuhan sangat stabil (Center dan Spencer, 1981).

Pertumbuhan *E. crassipes* utamanya tergantung pada kemampuan tumbuhan untuk menggunakan energi sinar matahari, komposisi nutrisi air, metode pembiakan dan faktor lingkungan. Tumbuhan air ini dapat mentoleransi pH 4 hingga 10, namun optimal pada pH netral. Temperatur optimal untuk pertumbuhan *E. crassipes* adalah 28 - 30°C. Temperatur di atas 33°C akan menghambat pertumbuhan lanjut (Magar *et al.*, 2017).

Dalam penelitian Djo *et al.* (2017), didapatkan hasil bahwa eceng gondok Dapat menurunkan COD dengan konsentrasi awal 47 mg/L mencapai 26,34 mg/L dalam waktu 14 hari. Terjadi peningkatan efektivitas penyisihan dari hari ke-1 hingga ke-14, yakni dari 10,71% menjadi 42,86%. Daya serap eceng gondok didapatkan 0,1232 mg COD/g eceng gondok. Gupta *et al.* (2012) menyatakan bahwa dalam pengolahan limbah tekstil, eceng gondok dapat menyisihkan 81,4% COD, 75% BOD, dan 46,6% TSS dan juga menurunkan pH air limbah dari alkali menjadi netral.

Rachmawati (2008) melaksanakan *range finding test* (RFT) terhadap eceng gondok dengan berbagai konsentrasi COD dan BOD. Ditemukan bahwa eceng gondok pada konsentrasi COD 536 mg/L dan BOD 214 mg/L layu setelah 5 hari pengolahan. Hasil RFT menyatakan eceng gondok mampu menyisihkan COD hingga 400 mg/L dan BOD hingga 160 mg/L dalam kondisi sehat.

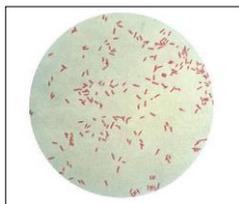
Hal ini disebabkan oleh mikroorganisme yang terdapat pada akar eceng gondok. Mikroorganisme yang tumbuh pada akar eceng gondok ini semakin efektif dalam menurunkan nilai COD karena jumlah mikroorganisme semakin banyak dan mikroorganisme tersebut semakin mampu beradaptasi dengan lingkungan tersebut (Setiadi, 1999).

Beberapa faktor yang mempengaruhi efektivitas penurunan COD dalam proses fitoremediasi dengan eceng gondok adalah:

- a. volume reaktor
- b. waktu tinggal
- c. kandungan oksigen
- d. jumlah tanaman yang diaplikasikan pada proses fitoremediasi.

2.14 *Pseudomonas aeruginosa*

P. aeruginosa merupakan bakteri gram-negatif yang berbentuk batang, asporogen, dan monoflagel. Bakteri ini memiliki warna yang berkilau dan bau seperti anggur. *P. aeruginosa* dapat tumbuh dengan baik pada suhu 25 – 37°C, namun dapat pula tumbuh pada suhu 42°C. Kemampuan ini membedakannya dari spesies *Pseudomonas* lainnya. *P. aeruginosa* mampu bertahan dalam berbagai kondisi lingkungan dan dapat ditemukan di mana-mana (Wu *et al.*, 2015).



Gambar 2.2 *Pseudomonas aeruginosa*

Sumber: Dao (2016)

Menurut penelitian Mahmudah (2015), *P. aeruginosa* memiliki kemampuan untuk dekolorisasi zat warna. Efisiensi penyisihan warna basis hijau sebesar 37%, direk basis biru sebesar 41%, dan secang sebesar 14%. Sedangkan pada penelitian lain ditemukan bahwa kemampuan *P. aeruginosa* untuk dekolorisasi pewarna *strawberry red* dan *orange yellow* adalah masing-masing 79,3% dan 70,1% (Lukito, 2013).

Berdasarkan penelitian Afzal *et al.* (2007), ketika ditumbuhkan dalam 1000 mg/L larutan fenol, *P. aeruginosa* dapat menyisihkan COD dan BOD sebanyak 86,8% dan 96,6%. Dalam waktu 40 jam, COD tereduksi dari 2032 mg/L mencapai 60 mg/L, dan BOD dari 773 mg/L mencapai 26 mg/L. Selain itu, dalam uji kultur tunggal terhadap limbah tekstil dengan COD 9333 mg/L, bakteri *P. aeruginosa* berhasil menyisihkan COD sebanyak 68% (Vijayalakshmi dan Muthukumar, 2015).

2.15 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang menjadi acuan penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu

Judul	Variabel	Jenis Limbah	Hasil Penelitian	Sumber
Decolorization and detoxification of textile wastewater by ozonation and coagulation process	COD, warna, toksisitas	Air limbah industri tekstil	Nilai awal COD 1150 mg/L. Dosis optimum alum 1500 mg/L dapat menyisihkan warna 60% dan COD 56%. Dosis optimum ferri klorida 1500 mg/L dapat menyisihkan warna 79% dan COD 55%.	Selcuk (2005)

Judul	Variabel	Jenis Limbah	Hasil Penelitian	Sumber
Efektivitas Penggunaan Tawas dan Karbon Aktif Pada Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu	TSS, COD, BOD	Limbah cair industri tahu	Dosis optimum alum 100 mg/L dapat menyisihkan TSS 93,87% (dari 312 mg/L) dan COD 57,43% (dari 2018,5 mg/L)	Nurlina <i>et al.</i> (2015)
Pengolahan Air Limbah Tekstil Menggunakan Tanaman Air dan Bioaugmentasi Bakteri	Warna	Pewarna Rhodamin B, Metilen biru, dan Metil Violet	Interaksi antara <i>E. crassipes</i> dan bakteri <i>P. aeruginosa</i> memiliki nilai efisiensi paling efektif pada hari ke-2 sebesar 16% pada warna rhodamin B, 74% pada warna metilen biru, dan 71% pada warna metil violet	Rofifah (2018)
Penyisihan COD, BOD, dan TSS Dalam Limbah Industri Pencelupan Benang Dengan Metode Bioreaktor Eceng Gondok (<i>Eichhornia crassipes</i>) dan	COD, BOD, TSS	Limbah industri pencelupan benang	Bioreaktor tanpa aerasi mencapai efisiensi penyisihan COD 45%, BOD 53,3%, dan TSS 67,89% dengan nilai	Rachmawati (2008)

Judul	Variabel	Jenis Limbah	Hasil Penelitian	Sumber
Koagulasi-Flokulasi			akhir masing-masing 220 mg/L, 74,73 mg/L, dan 149 mg/L	
Characteristics of phenol biodegradation in saline solutions by monocultures of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> and <i>Pseudomonas pseudomallei</i>	Fenol, BOD, COD	Air limbah industri farmasi	<i>P. aeruginosa</i> yang ditumbuhkan dalam konsentrasi fenol 1000 mg/L dapat menghasilkan efisiensi removal COD sebesar 86,8% dan BOD sebesar 96,6%	Afzal <i>et al.</i> (2007)
Improved biodegradation of textile dye effluent by coculture	COD, BOD, TSS	Air limbah tekstil	<i>P. aeruginosa</i> secara tunggal dapat menyisihkan COD awal 9333 mg/L sebanyak 68%. Dalam kultur campuran penyisihan COD 95% dan BOD 96,4%	Vijayalaksh-midevi dan Muthukumar (2015)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Umum

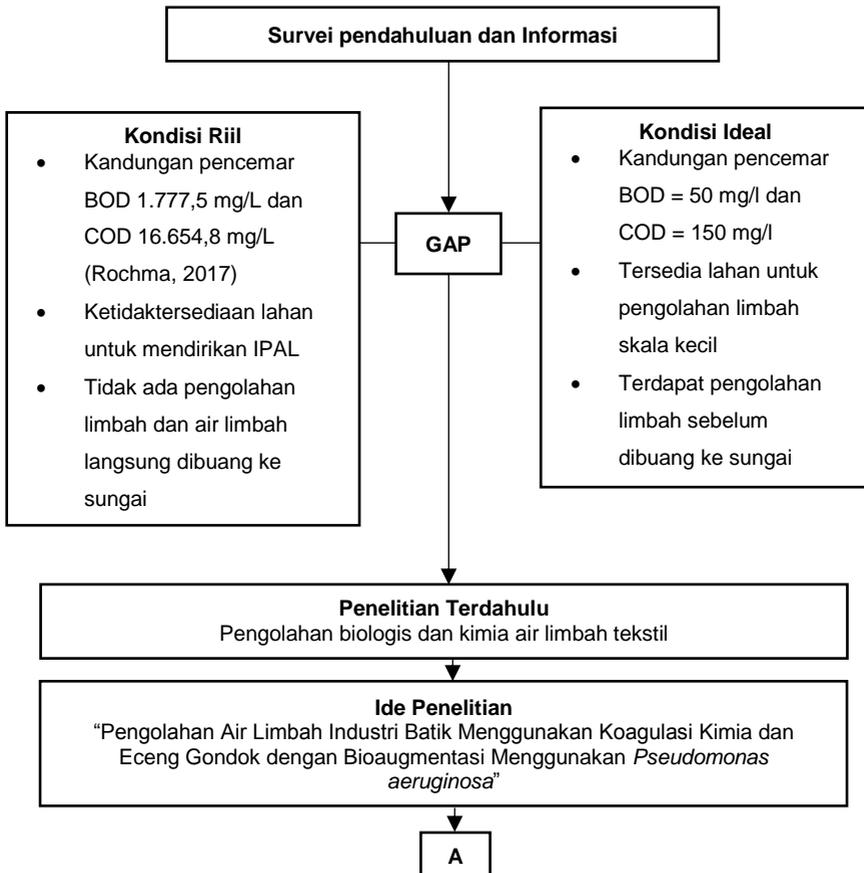
Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi konsentrasi BOD, COD, TSS dan zat pewarna pada limbah cair batik dengan proses pengolahan kimia dan biologis. Pengolahan kimia dilakukan dengan koagulasi-flokulasi, sementara pengolahan biologis menggunakan bioaugmentasi tumbuhan dengan bakteri. Pengolahan dioperasikan secara *batch* pada reaktor koagulasi-flokulasi dan bioreaktor. Aliran *batch* adalah sistem dimana debit tidak masuk maupun keluar selama reaksi dan proses berlangsung. Proses pengolahan kimia berawal dari koagulasi-flokulasi dengan koagulan alum diikuti oleh pengendapan. Sementara dalam pengolahan biologis digunakan bakteri *P. aeruginosa* dan tumbuhan eceng gondok. Pada penelitian ini, parameter utama yang diuji adalah konsentrasi BOD, COD, TSS dan warna. Sedangkan parameter pendukung adalah pH, suhu, jumlah mikroorganisme, serta berat basah dan berat kering tumbuhan. Jumlah mikroorganisme dianalisis dengan metode *Coloni Forming Unit* (CFU).

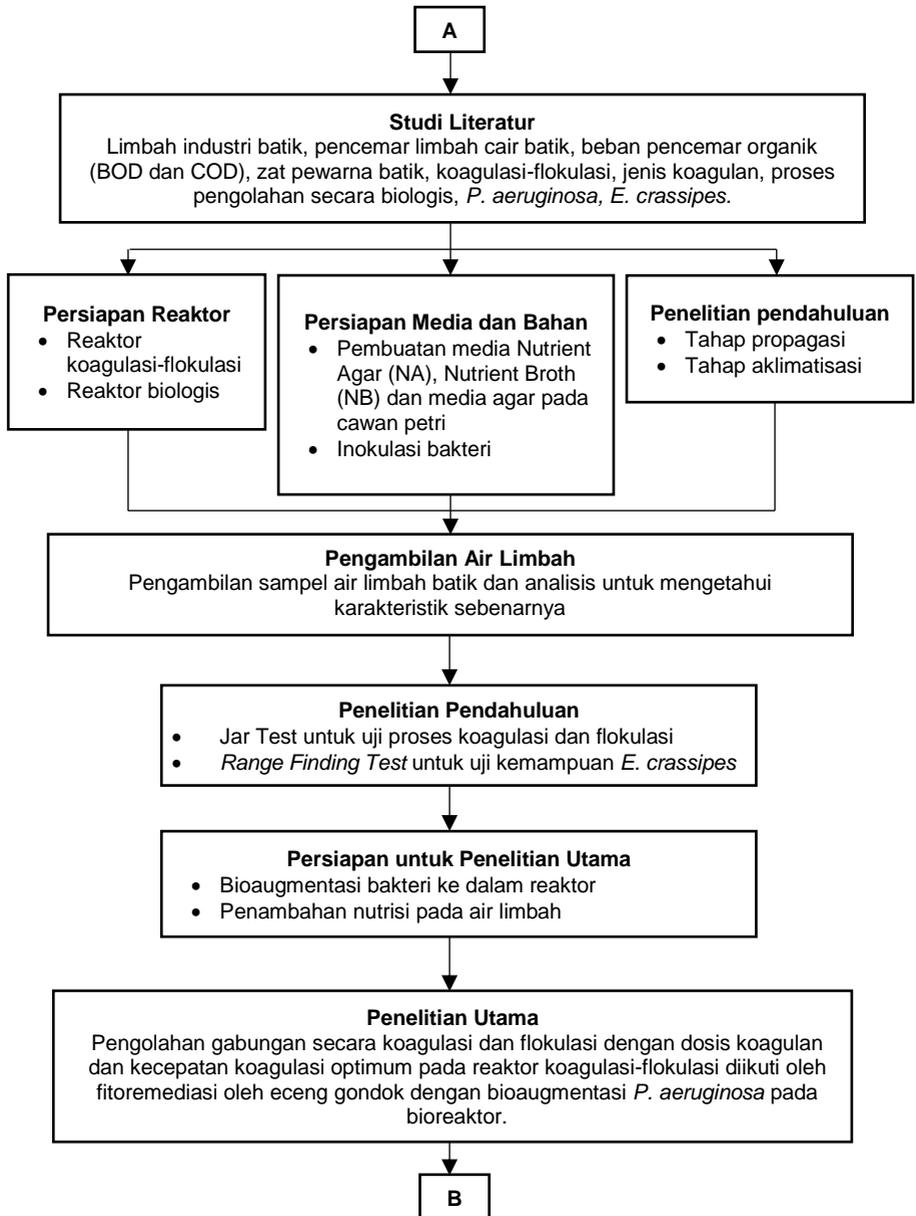
Pada awal penelitian dilakukan uji *jar test* untuk proses koagulasi-flokulasi terlebih dahulu. Uji tersebut bertujuan untuk menentukan dosis koagulan dan kecepatan pengadukan koagulasi optimum. Sebelum uji pengolahan dalam bioreaktor dilakukan tahap propagasi, yaitu proses memperbanyak tumbuhan untuk mempersiapkan kebutuhan tumbuhan pada penelitian ini. Selanjutnya adalah tahap aklimatisasi dimana tumbuhan dapat beradaptasi dengan kondisi atau media lingkungan tempat penelitian dilakukan. Setelah tahap aklimatisasi, penelitian utama dilakukan dengan air limbah batik yang telah melewati proses koagulasi-flokulasi. Pada tahap pengolahan kimia, dilakukan pengamatan karakteristik air limbah sebelum dan sesudah melewati reaktor koagulasi-flokulasi. Pada tahap pengolahan biologis, selain karakteristik air limbah, dilakukan pengamatan terhadap morfologi tumbuhan. Dengan ini dapat diketahui pengaruh zat pencemar bahan organik dan zat pewarna terhadap pertumbuhan eceng gondok. Dapat pula diketahui pengaruh

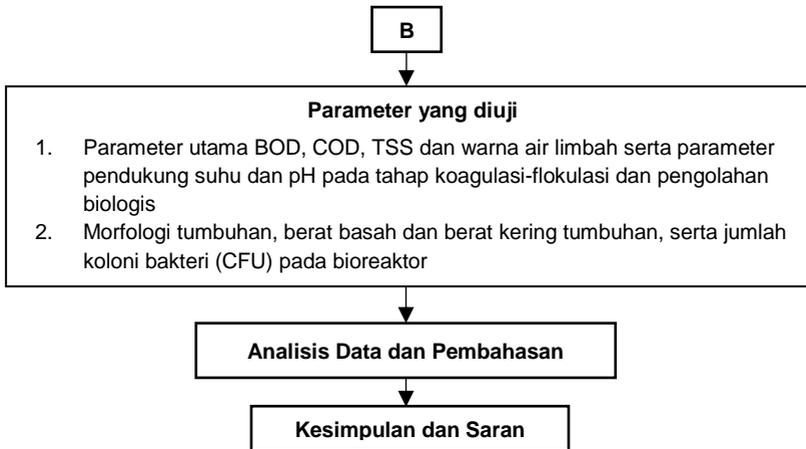
keberadaan bakteri *P. aeruginosa* di dalam reaktor berisi zat pencemar terhadap morfologi eceng gondok.

3.2 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian merupakan alur jalannya proses penelitian ini. Penyusunan alur berupa langkah-langkah dalam penelitian yang bertujuan untuk mempermudah pelaksanaan penelitian dan sebagai acuan dalam menjalankan penelitian. Kerangka penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.







Gambar 3.1 Kerangka Penelitian

3.3 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian merupakan langkah-langkah yang akan dilakukan selama penelitian ini. Pada tahapan penelitian akan dijelaskan lebih rinci langkah-langkah yang terdapat pada kerangka penelitian serta memudahkan pemahaman.

3.3.1 Survei Pendahuluan

Pada tahap survei pendahuluan dilakukan pengamatan pada lokasi *home industry* batik di Kampung Batik Jetis, Sidoarjo. Pengamatan atau survei dilakukan untuk mendapatkan gambaran mengenai kondisi riil pengolahan limbah batik. Pengamatan meliputi karakteristik limbah batik, adanya tempat pengolahan limbah, pembuangan akhir limbah, debit limbah setiap harinya, dan kemungkinan pencemaran yang terjadi akibat limbah cair batik

3.3.2 Ide Penelitian

Ide penelitian ini berasal dari adanya *gap* antara kondisi riil dan kondisi ideal elfuen air limbah hasil proses pewarnaan batik yang dibuang ke badan air. Air limbah tersebut dapat mencemari badan air karena memiliki kandungan organik dan warna yang

tinggi. Baku mutu limbah cair untuk industri tekstil berdasarkan Gubernur Jawa Timur No.72 Tahun 2013 tentang Baku Mutu Air Limbah Industri atau Kegiatan Usaha Lainnya di Jawa Timur dan US-EPA 2014 disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Baku Mutu Limbah Cair Industri Tekstil

Parameter	Kadar maksimum (mg/L)
BOD ₅	60 ^a
COD	150 ^a
TSS	50 ^a
Warna	550 ^b

Sumber: ^aPergub Jatim (2013), ^bUS-EPA (2014)

Oleh karena itu, diperlukan pengolahan lebih lanjut untuk mengurangi kandungan warna yang terdapat pada limbah industri tekstil. Berdasarkan penelitian terdahulu, uji penyisihan terhadap bahan organik yang ada di air limbah tekstil dengan tumbuhan eceng gondok dan bioaugmentasi bakteri *P. aeruginosa* belum diketahui. Melalui interaksi antara tumbuhan dan bakteri tersebut diharapkan diketahui kemampuan penyisihan polutan air limbah batik dengan parameter BOD, COD, TSS serta penyisihan warna. Penyisihan polutan dilakukan secara kimiawi terlebih dahulu dikarenakan beban polutan limbah cair dari proses pembuatan batik terlalu besar untuk diolah langsung secara biologis.

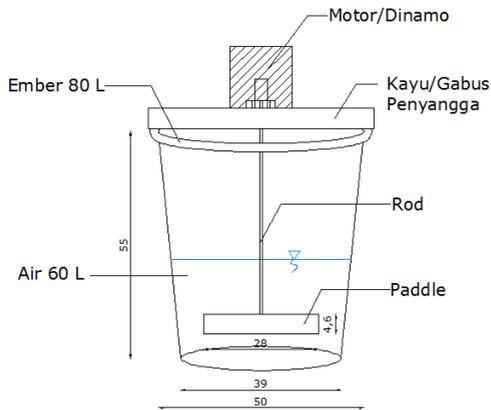
3.3.3 Studi Literatur

Studi literatur dilaksanakan untuk mencari dan mengumpulkan literatur seperti buku atau jurnal yang akan digunakan untuk mendukung pelaksanaan penelitian. Studi literatur dilakukan dengan mencari jurnal ilmiah, laporan tugas akhir, dan penelitian terdahulu. Studi literatur ini bertujuan untuk mengkaji teori-teori yang mendasari ruang lingkup penelitian ini serta memperoleh prosedur-prosedur penelitian yang menjadi acuan dalam penelitian.

3.3.4 Persiapan Reaktor

Reaktor yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- Reaktor yang digunakan untuk tahap propagasi dan tahap aklimatisasi berupa kontainer plastik dengan kapasitas 50 L
- Reaktor koagulasi-flokulasi berupa wadah dengan kapasitas 80 L dan diameter 50 cm dengan paddle dan motor yang ditetapkan pada rpm tertentu
- Reaktor *range finding test* berupa wadah dengan kapasitas 5 L dan diameter 22 cm
- Reaktor biologis berupa kontainer plastik berukuran 45 cm x 30 cm x 26,5 cm dengan kapasitas 25 L



(a)



(b)

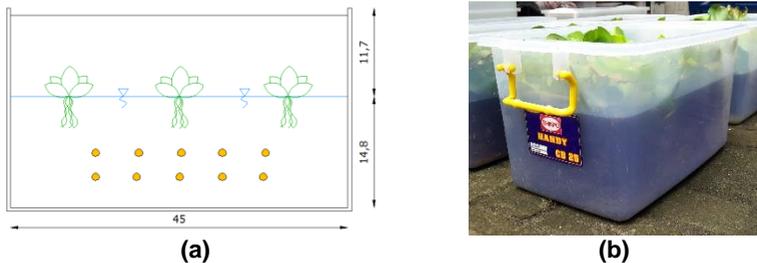


(c)

Gambar 3.2 Reaktor Koagulasi-Flokulasi

Keterangan: (a) desain reaktor (b) foto reaktor (c) foto paddle

Pada tahap pengolahan kimia, air ditampung pada bak penampung atau tandon berkapasitas 80 L. Reaktor koagulasi-flokulasi berkapasitas 80 L dengan diameter 50 cm. Pada reaktor tersebut terdapat paddle dengan ukuran 28 cm x 4,6 cm yang tersambung dengan rotor atau dinamo. Paddle akan berputar sesuai dengan rpm yang telah ditentukan. Desain dan foto reaktor koagulasi-flokulasi terdapat pada Gambar 3.2. Perhitungan desain reaktor koagulasi-flokulasi dapat dilihat pada Lampiran C.



Gambar 3.3 Reaktor Biologis

Keterangan: (a) desain reaktor (b) foto reaktor

Pada tahap propagasi dan aklimatisasi, digunakan reaktor dengan kapasitas 50 L. Pada penelitian utama, reaktor uji tahap pengolahan oleh tumbuhan menggunakan kontainer dengan kapasitas 25 L. Tahap pengolahan oleh tumbuhan reaktor dioperasikan dalam sistem *batch*. Reaktor diisi dengan air limbah tekstil sebanyak 15 L dan tumbuhan eceng gondok yang kemudian diinteraksikan dengan bakteri *P. aeruginosa*. Desain dan foto reaktor biologis terdapat pada Gambar 3.3

Reaktor utama pada penelitian ini terdiri dari reaktor koagulasi-flokulasi dan bioreaktor dengan eceng gondok dan bakteri *P. aeruginosa*.

3.3.5 Persiapan Media dan Bahan Penelitian

Persiapan media dan bahan untuk penelitian ini meliputi:

1. Pembuatan *Nutrient Broth* (NB)

NB merupakan media yang dapat digunakan untuk propagasi mikroorganisme dalam jumlah besar. Pembuatan NB dilakukan dengan cara melarutkan

serbuk NB sesuai kebutuhan ke dalam akuades. Larutan NB dalam akuades kemudian dituang dalam labu erlenmeyer. Labu erlenmeyer disumbat dengan kapas lemak, kemudian dilakukan sterilisasi dalam autoklaf pada suhu 121°C selama 15 menit atau lebih (Harley & Prescott, 2002).

2. Pembuatan *Nutrient Agar* (NA)

NA adalah media semisolid yang digunakan sebagai media inokulasi bakteri. Media NA disiapkan dengan melarutkan serbuk NA sesuai dengan perhitungan ke dalam akuades pada erlenmeyer. Media NA yang sudah terlarut ditambahkan HCl atau NaCl agar pH sesuai dengan kebutuhan bakteri. Setelah itu larutan NA dituang ke tabung reaksi, disumbat kapas lemak, dan dilakukan sterilisasi dalam autoklaf pada suhu 121°C selama 15 menit atau lebih (Harley & Prescott, 2002).

3. Pembuatan Media Selektif pada Cawan Petri

Pembuatan media selektif pada cawan petri serupa dengan pembuatan media agar miring. Media selektif yang digunakan untuk analisis *Colony Forming Units* (CFU) *P. aeruginosa* adalah Cetrimide Agar merek Merck. Media selektif dituangkan dari tabung reaksi yang berisi 10 mL media selektif steril ke dalam masing-masing cawan petri secara aseptis (Ngajow *et al.*, 2013; Harley & Prescott, 2002).

4. Inokulasi dan Peremajaan Bakteri

Biakan bakteri *P. aeruginosa* diinokulasikan sebanyak 1 ukuran jarum ose ke media agar pada cawan petri yang telah dipersiapkan. Setelah proses inokulasi, bakteri diinkubasikan selama 24 jam pada suhu 37°C (Jauhari, 2010).

5. Inokulasi Bakteri ke Reaktor

Inokulasi isolat bakteri yang sudah diinokulasikan pada media cawan petri selama 24 jam diambil menggunakan jarum ose yang sudah disterilkan sebanyak 10 loop untuk kemudian dilarutkan ke dalam 2,5 L media NB. Setelah dicampurkan ke media NB, inokulum diinkubasi pada *shaker* selama fase eksponen bakteri. Hal ini dikarenakan pertumbuhan maksimum terjadi pada saat

fase eksponen (Purwanti et al., 2016). *Optical density* dari biakan bakteri kemudian diukur menggunakan UV-Spektrofotometer dengan panjang gelombang 600 nm untuk mendapatkan nilai OD_{600} . Waktu eksponensial bakteri *P. aeruginosa* terjadi antara 4 – 8 jam dan tercapai apabila $OD_{600} = 0,6$ (Kurniawan, 2017). Setelah mengukur nilai OD_{600} , media NB berisi biakan bakteri tersebut dituangkan kedalam bioreaktor sesuai dengan volume yang telah ditentukan dan diaduk agar homogen.

3.3.6 Pengambilan Air Limbah Industri Batik

Pengambilan air limbah diperlukan untuk analisis dan bahan utama dalam pengolahan. Analisis awal air limbah akan memperoleh hasil karakteristik sebenarnya. Sampel dalam penelitian ini adalah air limbah dari proses pewarnaan produksi batik. Analisis air sampel dilakukan di Laboratorium Pemulihan Air dan Laboratorium Remediasi Lingkungan di Departemen Teknik Lingkungan ITS, Surabaya.

Uji karakteristik limbah awal dilakukan untuk mendapatkan nilai BOD awal, COD awal, TSS awal, absorbansi warna awal, pH awal, dan suhu awal. Nilai BOD, COD dan TSS diuji sesuai prosedur pada SNI. Nilai absorbansi warna awal diuji dengan spektrofotometer pada panjang gelombang sesuai jenis pewarna pada limbah cair. Akan didapatkan kurva kalibrasi menggunakan air PDAM sebagai blanko.

3.3.7 Penelitian Pendahuluan

1 Tahap Propagasi

Tahap propagasi berfungsi untuk menyediakan stok tumbuhan yang akan digunakan pada saat penelitian. Selama masa propagasi dilakukan pengamatan terhadap laju pertumbuhan tumbuhan (*growth rate*) dan dibiarkan hingga tumbuh tunas (*second generation*) (Raissa dan Tangahu, 2017). Tahap propagasi dilakukan minimal selama satu bulan sampai tumbuhan memiliki ukuran secara optimum (Suelee, 2015). Pada penelitian ini tahap propagasi dilakukan di rumah kaca menggunakan media air PDAM dengan penambahan

nutrisi NPK. Reaktor propagasi dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Reaktor Propagasi *E. crassipes*

- 2 Tahap Aklimatisasi
Tahap aklimatisasi dilakukan agar tumbuhan *E. crassipes* dapat menyesuaikan diri dengan lingkungan dan media yang akan digunakan pada tahap pengolahan oleh tumbuhan. Proses tahap aklimatisasi tumbuhan ini dilakukan dengan cara meletakkan tumbuhan pada reaktor selama 7 hari menggunakan air PDAM (Puspita *et al.*, 2011). Tahap aklimatisasi dilakukan dalam reaktor dengan kapasitas 25 L. Pada kondisi ini diharapkan tumbuhan dapat beradaptasi dan tumbuh subur.
- 3 *Jar Test*
Jar test dilakukan untuk menentukan dosis koagulan dan kecepatan pengadukan optimum pada proses koagulasi. Koagulan yang digunakan adalah aluminium sulfat atau alum. Variasi dosis yang akan diterapkan adalah 500 mg/L, 1000 mg/L, 1500 mg/L, 2000 mg/L, dan 2500 mg/L. Variasi kecepatan pengadukan untuk *rapid-mixing* adalah 80 rpm dan 100 rpm. *Rapid-mixing* dilakukan selama 1 menit. Sementara itu, *slow-mixing*

dilakukan dengan kecepatan 30 rpm selama 20 menit. Prosedur uji *jar test* dilakukan sesuai dengan SNI 19-6449-2000. Alat *jar test* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Alat Jar Test

4 *Range Finding Test*

Range Finding Test (RFT) bertujuan untuk menentukan konsentrasi maksimum air limbah batik yang mampu diolah eceng gondok dalam sistem bioreaktor. Air limbah yang digunakan dalam RFT adalah air limbah batik hasil pengolahan oleh koagulasi-flokulasi yang kemudian diencerkan dengan air PDAM hingga mencapai konsentrasi yang berbeda-beda. Variasi konsentrasi air limbah yang digunakan adalah 100%, 75%, 50%, 25%, 10%, dan kontrol 0%.

Pada tahap ini dilakukan pengamatan terhadap kondisi fisik eceng gondok selama 7 hari dan diuji parameter COD, TSS dan warna pada awal dan akhir proses RFT. Konsentrasi limbah tertinggi pada bioreaktor dengan tumbuhan yang masih hidup dan dalam keadaan baik digunakan sebagai batas konsentrasi air limbah dalam tahap penelitian selanjutnya. Reaktor yang digunakan dalam tahap *range finding test* dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Reaktor *Range Finding Test*

3.3.8 Penelitian Utama

Penelitian utama terdiri dari kegiatan-kegiatan yang dilaksanakan sebelum, sesudah, dan saat tahap pengolahan oleh koagulasi-flokulasi dan tumbuhan dengan bioaugmentasi bakteri. Pada penelitian ini terdapat reaktor utama koagulasi-flokulasi, reaktor utama biologis, dan reaktor kontrol biologis. Reaktor utama biologis atau bioreaktor berisi tumbuhan eceng gondok dengan bioaugmentasi menggunakan bakteri *P. aeruginosa*. Reaktor kontrol merupakan bioreaktor yang hanya berisi eceng gondok dengan air limbah. Reaktor kontrol tumbuhan tanpa bakteri bertujuan untuk mengetahui efektifitas penambahan bakteri, dampaknya pada morfologi tumbuhan, dan keberadaan bakteri *indigenus*. Jumlah reaktor kontrol disusun secara tunggal.

Parameter dan variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- a. Parameter utama berupa BOD, COD, TSS dan konsentrasi warna
- b. Parameter pendukung yaitu pH, suhu, morfologi tumbuhan (lebar daun, panjang tumbuhan dan panjang akar), berat basah dan berat kering tumbuhan, dan jumlah koloni bakteri (CFU)
- c. Variabel pertama yang digunakan adalah dosis koagulan alum dan kecepatan pengadukan proses koagulasi. Lama waktu koagulasi adalah 1 menit, flokulasi 20 menit, dan sedimentasi 1 jam (Selcuk, 2005).

- d. Variabel kedua yang digunakan adalah konsentrasi bakteri *P. aeruginosa* yang akan berinteraksi dengan tumbuhan air eceng gondok. Lama waktu tinggal adalah 7 hari.

Dosis koagulan dan kecepatan pengadukan merupakan variasi yang digunakan pada penelitian pendahuluan *jar test* untuk menentukan titik optimum. Variasi dosis koagulan dan kecepatan pengadukan pada penelitian ini mengacu pada penelitian-penelitian sebelumnya sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Sementara itu, konsentrasi bakteri *P. aeruginosa* pada penelitian utama mengacu pada penelitian terdahulu yang menggunakan bakteri dengan spesies serupa. Romayanto (2006) menggunakan dua jenis *Pseudomonas sp.* sebanyak 1000 mL dan 500 mL dalam reaktor berisi 10 L air limbah. Berdasarkan acuan tersebut, penelitian ini akan menggunakan konsentrasi bakteri sebesar 5% dan 10% terhadap volume air limbah.

Tabel 3.2 Penentuan Dosis Koagulan dan Kecepatan Pengadukan

No	Acuan Terdahulu	Dosis Koagulan Alum (mg/L)	Kecepatan Pengadukan (rpm)		Variabel Penelitian	
			Rapid	Slow	Dosis (mg/L)	Kecepatan Pengadukan (rpm)
1	Guendy (2008)	1, 3, 4, 10, 20, 40, 80	60–80	30	500, 1000, 1500, 2000, 2500	Rapid mixing: 80 dan 100 Slow mixing: 30
2	Selcuk (2005)	250, 500, 750, 1000, 1500, 2000	100	30		
3	Abdel-Fatah <i>et al.</i> (2015)	400 – 1400	80-100	30		
4	Sayuti (2015)	3500, 4000, 4500	100	30		
5	Norjannah (2015)	2500, 3000, 3500	90	30		
6	Nurlina <i>et al.</i> (2015)	10 – 120	100	60		

Rincian variabel yang digunakan pada tahap *jar test* untuk menentukan dosis optimum koagulan dan kecepatan pengadukan

optimum terdapat pada Tabel 3.3. Sementara itu variasi reaktor yang akan digunakan untuk tahap pengolahan biologis pada penelitian utama terdapat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.3 Variabel Jar Test

Kecepatan Pengadukan Koagulasi	Dosis Koagulan				
	500 mg/L (1)	1000 mg/L (2)	1500 mg/L (3)	2000 mg/L (4)	2500 mg/L (5)
(A) 80 rpm	A1	A2	A3	A4	A5
(B) 100 rpm	B1	B2	B3	B4	B5

Tabel 3.4 Reaktor Biologis

Reaktor Utama	Variabel Konsentrasi <i>P.aeruginosa</i>	
	(A) 5%	(B) 10%
Reaktor Kontrol		

Sebelum dilaksanakan tahap pengolahan biologis pada penelitian utama, dilakukan dua persiapan, yaitu:

1. Penambahan nutrisi pada air limbah

Air limbah hasil proses pengolahan koagulasi-flokulasi diukur kandungan nutrisinya (amonium, fosfat, dan kalium). Dilakukan penambahan nutrisi pada air limbah untuk menunjang pertumbuhan eceng gondok. Gupta *et al.* (2012) menyimpulkan bahwa rasio C : N : P : K untuk

pertumbuhan optimum eceng gondok adalah 100 : 10 : 1,5 : 26. Penambahan nutrisi dilakukan sebelum tahap pengolahan biologis dan disesuaikan dengan konsentrasi C yang ada pada air limbah.

2. Bioaugmentasi bakteri ke dalam reaktor

Media NB yang telah diinokulasikan dengan bakteri *P. aeruginosa* dan nilai OD₆₀₀ yang telah sesuai disiapkan dalam volume sebanyak 5% dan 10% dari volume air limbah yang digunakan. Kemudian media NB dituangkan ke dalam bioreaktor dan diaduk agar homogen.

Pada penelitian utama, dilakukan empat jenis pengambilan sampel, yaitu sebelum dan setelah proses pada reaktor koagulasi-flokulasi, serta sebelum dan setelah proses biologis. Sampel yang dikumpulkan diuji untuk mendapatkan nilai dari setiap parameter yang telah ditentukan. Pengukuran COD, BOD, TSS, warna, dan CFU (*Colony Forming Units*) dilakukan selama proses pengolahan. Pengamatan morfologi tumbuhan dilakukan setiap hari selama proses pengolahan. Sementara berat basah dan berat kering tumbuhan diukur pada awal dan akhir tahap pengolahan. Parameter yang akan diuji beserta metodenya terdapat pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Parameter Penelitian dan Metode Uji

Parameter	Metode/Alat	Standar/Sumber
BOD	Winkler	SNI 6989.72:2009
COD	Refluks terbuka, titrimetri	SNI 06-6989.15-2004
TSS	Gravimetri	SNI 06-6989.3-2004
Warna	Spektrofotometri	SNI 6989.80:2011
pH	pH meter	SNI 06-6989.11-2004
CFU	Standard Plate Count	Harley & Prescott, 2002

Berikut adalah penjelasan langkah-langkah pada penelitian utama beserta beberapa metode pengumpulan dan analisis data untuk setiap parameter pada penelitian ini.

1. Pengujian Konsentrasi Beban Organik Limbah Cair
Pengukuran kadar BOD menggunakan metode sesuai SNI 6989.72:2009 yang bertujuan untuk

menentukan jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan oleh mikroba aerobik dalam proses oksidasi bahan organik karbon dalam contoh uji air limbah, efluen atau zat cair yang tercemar. Uji kadar BOD dilakukan selama 5 hari pada suhu 20°C.

Pengukuran COD dilakukan sesuai SNI 06-6989.15-2004 dengan metode refluks terbuka secara titrimetri. Metode ini menguji kebutuhan oksigen kimia dalam air dan air limbah dengan reduksi Cr₂O₇ dan diukur secara spektrofotometri titrimetri dengan larutan standar FAS.

2. Pengujian Konsentrasi *Total Suspended Solid*

Pengukuran kadar TSS mengaju pada SNI 06-6989.3-2004 dengan metode secara gravimetri. Sampel air disaring dengan kertas saring yang telah ditimbang, lalu dikeringkan pada suhu 105°C. Kenaikan dalam berat mewakili jumlah TSS pada sampel air.

3. Pengujian Konsentrasi Warna

Pada uji warna, sampel hasil pengolahan biologis *dicentrifuge* selama 20 menit dengan kecepatan 5000 rpm. Hal ini dilakukan agar material padat seperti rambut akar dan/atau sel mikroba dalam air limbah terpisahkan (Telke *et al.*, 2009). Supernatan diambil untuk dianalisis pada spektrofotometer dengan panjang gelombang yang telah ditentukan sehingga dapat diketahui kemampuan absorbannya.

Sementara untuk sampel awal dan hasil proses fisik-kimia tidak perlu dipisahkan oleh *centrifuge*. Panjang gelombang maksimum untuk warna limbah cair ditentukan menggunakan sampel awal air limbah. Nilai adsorbansi pada titik puncak akan menentukan panjang gelombang maksimum. Uji warna dilakukan dengan mengukur absorbansi sampel uji pada panjang gelombang dengan serapan maksimum. Kemudian dihitung persentase dekolorisasi dihitung dari selisih antara nilai awal dan akhir dengan rumus berikut:

$$\% \text{Dekolorisasi} = \frac{\text{Nilai absorbansi awal} - \text{Nilai absorbansi akhir}}{\text{Nilai absorbansi awal}} \times 100\%$$

(Tan *et al.*, 2016)

Pada uji konsentrasi warna ini digunakan air aquades sebagai larutan blanko untuk setiap warnanya sebagai kalibrasi.

4. Pengumpulan Data untuk Parameter Suhu

Pengukuran suhu dilakukan secara langsung pada bagian tengah tiap reaktor menggunakan termometer lab. Pengukuran suhu dilakukan setiap hari secara berturut-turut terhitung sejak tahap pengolahan oleh karbon aktif.

5. Pengumpulan Data untuk Parameter pH

Pengukuran pH dilakukan dengan pengukuran secara langsung pada bagian tengah media di dalam tiap reaktor menggunakan pH meter. Sebelum pengukuran, pH meter wajib dikalibrasi agar hasilnya akurat. Pengukuran pH dilakukan setiap hari terhitung sejak tahap pengolahan oleh tumbuhan.

6. Pengukuran Berat Basah dan Berat Kering Tumbuhan

Pengukuran berat basah dan berat kering dilakukan dengan mengambil tumbuhan eceng gondok, kemudian ditimbang sebagai berat basah dengan neraca analitik. Neraca analitik yang digunakan pada penelitian ini adalah merek Ohaus. Tahap selanjutnya adalah mengeringkan tumbuhan tersebut pada oven dengan suhu 105°C selama 24-36 jam (Vamerali *et al.*,2009). Setelah tahap pengeringan, setiap unit tumbuhan diletakkan dalam desikator selama 15 menit agar suhu tumbuhan sesuai dengan suhu ruang dan tidak ada penyerapan kadar air dari udara luar. Tumbuhan kemudian ditimbang sebagai berat kering. Pengukuran ini dilakukan satu kali sebelum dan satu kali sesudah tahap pengolahan oleh tumbuhan.

7. Pengamatan Morfologi Tumbuhan Secara Langsung

Kegiatan pengamatan morfologi tumbuhan secara langsung meliputi pengukuran panjang akar, jumlah daun dan lebar daun tumbuhan *E. crassipes*. Pengukuran morfologi tumbuhan dilakukan pada awal dan akhir proses pengolahan oleh tumbuhan.

8. Uji CFU (*Coloni Forming Unit*)

Uji CFU bertujuan untuk menghitung jumlah mikroorganisme dalam suatu sampel. Metode ini menggunakan hitungan cawan, maka diperlukan pengenceran sebelum ditumbuhkan pada medium agar di cawan petri. Setelah isolat bakteri diinokulasi pada cawan petri, akan terbentuk koloni dalam jumlah yang dapat dihitung. Jumlah terbaik yang dihasilkan adalah diantara 25-250 koloni. Pada metode ini diasumsikan bahwa setiap sel bakteri yang hidup terpisah dari yang lainnya akan berkembang menjadi koloni diskrit tunggal (CFU). Dengan demikian, jumlah koloni menunjukkan jumlah bakteri hidup yang bisa tumbuh di bawah kondisi inkubasi yang dipekerjakan.

Pengenceran biasa dilakukan secara berlapis (contohnya, 10^{-4} sampai 10^{-9}) dikarenakan jumlah bakteri sesungguhnya yang hidup dalam sampel tidak diketahui. Ketepatan yang lebih tinggi dapat dicapai dengan melakukan rangkap dua atau rangkap tiga pada masing-masing pengenceran (Harley & Prescott, 2002).

Alat dan bahan yang diperlukan adalah botol sampling steril, cawan petri steril, media selektif, dan larutan pengencer NaCl. Alat dan bahan untuk uji CFU harus dalam keadaan steril. Diambil sampel pada reaktor dengan botol steril minimal 5 mL. Kemudian disiapkan 6 tabung reaksi yang masing-masing berisi larutan NaCl sebanyak 9 mL diberikan label 10^{-2} , 10^{-4} , 10^{-6} , dan 10^{-8} . Selanjutnya cawan petri diberi label 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} , 10^{-8} , dan 10^{-9} . Diambil 0,1 mL air sampel yang dimasukkan ke tabung reaksi larutan NaCl 10^{-2} , dan dikocok hingga homogen. Sampel sebanyak 0,1 mL dari tabung reaksi 10^{-2} diambil untuk dimasukkan ke tabung reaksi 10^{-4} . Seterusnya dilakukan hingga memasukkan 0,1 mL ambil dari tabung reaksi 10^{-6} dan dimasukkan ke tabung reaksi 10^{-8} . Dari tabung reaksi 10^{-4} diambil sebanyak 1 ml ke dalam cawan petri 10^{-4} dan 0,1 ml ke dalam cawan petri 10^{-5} . Dialkukan hal serupa untuk tabung reaksi lainnya.

Setiap media selektif yang telah dipanaskan dituang ke masing-masing cawan petri. Kemudian digoyangkan agar media tersebar merata. Setelah media selektif memadat, cawan petri diposisikan terbalik dan diinkubasi selama 24 jam pada suhu 37°C.

Setelah 24 jam, perhitungan jumlah koloni dihitung menggunakan *Bacteria Colony Counter*. Dari hasil perhitungan tersebut dapat dimasukkan ke rumus sebagai berikut:

$$\text{Jumlah koloni (CFU/mL)} = \frac{\text{jumlah koloni per cawan}}{\text{ml sampel pada cawan}} \times \frac{1}{fp}$$

(Harley & Prescott, 2002)

Uji CFU akan dilakukan terhadap bakteri *P. aeruginosa* menggunakan media selektif Cetrimide Agar.

3.4 Analisis Data

Analisis data dilakukan pada setiap data yang sudah terkumpul. Data yang didapatkan dibuat dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan dalam proses analisis. Setelah data dibuat, dilakukan analisis dan pembahasan terhadap yang sudah diperoleh. Dari analisis tersebut akan diperoleh hasil pengolahan bahan organik, zat padat tersuspensi dan zat pewarna dalam masing-masing tahap pengolahan.

3.5 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan berdasarkan hasil analisis data penelitian serta pembahasan. Kesimpulan harus menjawab tujuan penelitian yang akan dicapai. Saran diberikan sebagai rekomendasi untuk penelitian yang akan dilakukan selanjutnya. Tujuan dari rekomendasi ini adalah untuk memperbaiki penelitian selanjutnya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4 ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Awal Air Limbah

Air limbah yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah *home-industry* batik di Kampung Batik Jetis, Sidoarjo. *Home-industry* tersebut memproduksi batik hari Senin–Sabtu setiap minggunya. Air limbah hasil proses pewarnaan batik dihasilkan sebanyak ± 25 L setiap 2 hari. Karakteristik awal limbah dari hasil analisis pendahuluan dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.1.

Tabel 4.1 Karakteristik Awal Air Limbah

Parameter	Nilai	Baku Mutu ¹⁾
pH	9,63	6,0 – 9,0
TSS	2720 mg/L	50 mg/L
COD	8660 mg/L	150 mg/L
BOD	899,1 mg/L	60 mg/L

¹⁾ Baku Mutu Air Limbah untuk Industri Tekstil - Peraturan Gubernur Jawa Timur 2013



Gambar 4.1 Air Limbah Industri Batik

Berdasarkan hasil analisis awal air limbah tersebut, diketahui bahwa air limbah batik tersebut memiliki konsentrasi COD dan TSS yang sangat tinggi. Sementara nilai COD dan BOD menunjukkan bahwa rasio BOD/COD bernilai sekitar 0,1 yang menandakan bahwa air limbah bersifat toksik. Selain itu, terlihat bahwa air limbah batik memiliki warna ungu pekat. Dari warna tersebut ditemukan panjang gelombang maksimum (λ_{\max}) 530 nm.

Dengan λ_{\max} 530 nm ditemukan absorbansi (A) air limbah batik adalah 1,977.

Air limbah *home-industry* batik di Kampung Batik Jetis, Sidoarjo belum memenuhi baku mutu dan perlu diolah sebelum dibuang ke badan air. Perlu direncanakan proses pengolahan yang sesuai dengan karakteristik air limbah.

4.2 Penelitian Pendahuluan

Sebelum melakukan penelitian utama, dilakukan penelitian pendahuluan yang meliputi propagasi tumbuhan, aklimatisasi tumbuhan, *jar test*, dan *range finding test*. Penelitian pendahuluan dilakukan untuk memenuhi faktor-faktor yang diperlukan untuk penelitian utama nantinya.

4.2.1 Tahap Propagasi

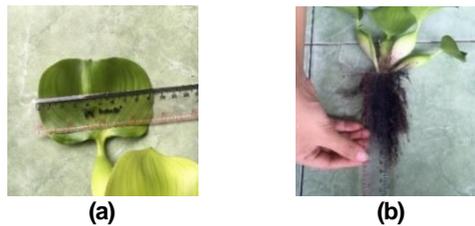
Tahap propagasi *E. crassipes* atau eceng gondok bertujuan untuk memperbanyak tumbuhan sesuai dengan jumlah yang diperlukan pada penelitian. Selain itu, propagasi juga dilakukan untuk mengetahui laju pertumbuhan eceng gondok. Tahap propagasi berlangsung selama 30 hari hingga tumbuh tunas (*second generation*). Tumbuhan yang tumbuh dari tunas tersebut akan digunakan untuk uji pengolahan air limbah (*phytotreatment*). Untuk memastikan bahwa kondisi tumbuhan yang digunakan adalah sama, maka dipilih tumbuhan dengan umur dan tinggi yang sama pada setiap tahap penelitian.



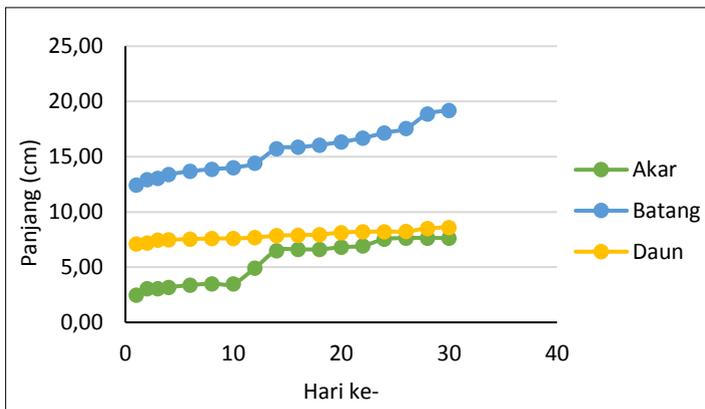
Gambar 4.2 Fase Generatif Eceng Gondok

Eceng gondok umumnya melakukan reproduksi secara vegetatif, yaitu dengan tumbuhnya tunas melalui stolon. Eceng gondok akan mencapai fase vegetatif setelah berusia 11 hari (Nuryana, 2016). Pada fase vegetatif diharapkan tumbuhan dapat menyerap kontaminan secara optimal. Sementara setelah usia satu bulan, eceng gondok mencapai fase generatif yang ditandai dengan keluarnya bunga. Fase generatif eceng gondok dapat dilihat pada Gambar 4.2.

Laju pertumbuhan eceng gondok diketahui dengan mengamati karakteristik fisik eceng gondok, yaitu lebar daun, panjang akar, dan tinggi tumbuhan. Proses pengukuran lebar daun dan panjang akar eceng gondok dapat dilihat pada Gambar 4.3. Sementara hasil pengamatan karakteristik fisik eceng gondok selama satu bulan dapat dilihat pada Gambar 4.4



Gambar 4.3 Pengukuran (a) lebar daun dan (b) panjang akar



Gambar 4.4 Laju Pertumbuhan Eceng Gondok

4.2.2 Tahap Aklimatisasi

Tahap aklimatisasi tumbuhan dilakukan agar tumbuhan dapat beradaptasi dengan kondisi lingkungan dimana uji pengolahan pada penelitian utama akan berlangsung. Proses aklimatisasi dilakukan selama 7 hari menggunakan air PDAM sebagai media tumbuhan. Tumbuhan diletakkan dalam reaktor yang nantinya akan menjadi reaktor uji. Keadaan fisik tumbuhan diamati dan setelah 7 hari, tumbuhan dalam keadaan baik (tidak layu dan tidak mati) dipilih untuk uji pengolahan air limbah (fitoremediasi). Proses aklimatisasi dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Aklimatisasi Eceng Gondok

4.2.3 Jar Test

Uji jar test dilakukan dengan waktu koagulasi selama 1 menit, flokulasi 20 menit, dan sedimentasi 1 jam dengan kondisi awal sampel air limbah batik sebagai berikut:

- COD = 8660 mg/L
- BOD = 899,1 mg/L
- TSS = 2720 mg/L
- Warna = 1,977 A (panjang gelombang = 530 nm)
- pH = 9,63

Dalam proses koagulasi-flokulasi digunakan aluminium sulfat ($Al_2(SO_4)_3$) atau alum sebagai koagulan. Variasi dosis alum yang digunakan adalah 500 mg/L, 1000 mg/L, 1500 mg/L, 2000 mg/L, dan 2500 mg/L untuk menentukan dosis optimum alum. Koagulan alum bekerja dengan baik pada rentang pH 5,5 – 8 (Reynolds dan Richards, 1996). Diamati bahwa penambahan alum kedalam air limbah menurunkan pH air limbah menjadi 3,87 – 4,46.

Hasil uji jarrest dengan variasi kecepatan pengadukan koagulasi 100 rpm dan 80 rpm adalah sebagai berikut.

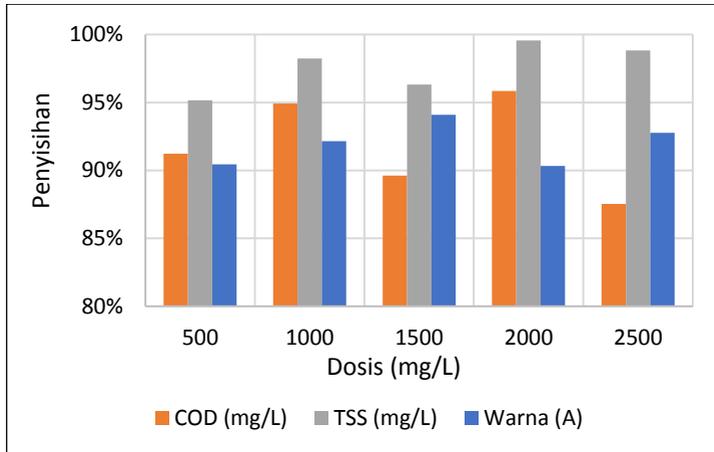
a) Variasi dosis alum dengan 100 rpm

Uji jar test pertama dilakukan menggunakan koagulan alum dengan kecepatan pengadukan koagulasi 100 rpm. Supernatan dari hasil *jar test* diambil dan diuji konsentrasi COD, TSS, dan absorbansi warna sehingga didapatkan efisiensi penyisihan untuk masing-masing parameter. Hasil uji jar test dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Hasil Uji Jar Test Aluminium Sulfat dengan 100 rpm

Dosis alum (mg/L)	COD (mg/L)	Penyisihan COD	TSS (mg/L)	Penyisihan TSS	Warna (A)	Penyisihan Warna
500	760	91,2%	132	95,1%	0,189	90,4%
1000	440	94,9%	48	98,2%	0,155	92,2%
1500	900	89,6%	100	96,3%	0,117	94,1%
2000	360	95,8%	12	99,6%	0,191	90,3%
2500	1080	87,5%	32	98,8%	0,143	92,8%

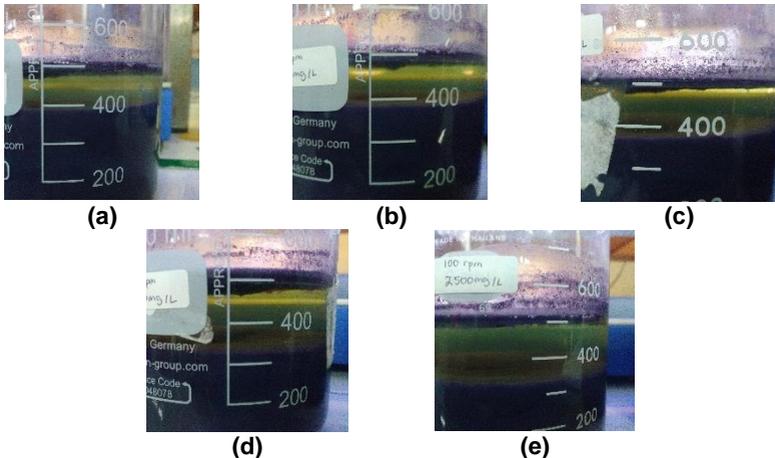
Dari data tersebut dapat dibuat suatu grafik yang dapat menunjukkan pengaruh dosis aluminium sulfat terhadap penyisihan COD, TSS dan warna, serta hubungan efisiensi penyisihan antara parameter-parameter tersebut. Efisiensi penyisihan oleh uji jarrest dengan 100 rpm disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Efisiensi Penyisihan COD, TSS dan Warna dengan 100 rpm

Dari data pada Gambar 4.6, diketahui bahwa koagulan alum bekerja paling baik dalam menyisihkan konsentrasi TSS pada limbah cair baik, dimana penyisihan semua variasi dosis alum melebihi 95%. Sementara itu, penyisihan COD berkisar antara 89,6% hingga 95,8%, dan penyisihan warna berkisar antara 90,3% hingga 94,1%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses koagulasi dan flokulasi menggunakan koagulan alum dapat mengurangi pencemar COD, TSS dan warna secara signifikan. Penyisihan COD dan TSS terbaik terdapat pada dosis aluminium sulfat 2000 mg/L. Dosis tersebut menghasilkan efisiensi penyisihan COD sebesar 95,8% dan efisiensi penyisihan TSS sebesar 99,6%. Hasil tersebut menunjukkan korelasi antara penyisihan COD dan TSS, dimana penyisihan tertinggi kedua parameter tersebut dicapai oleh dosis koagulan yang sama. Hasil akhir nilai COD adalah 360 mg/L dan TSS adalah 12 mg/L. Sementara itu, penyisihan warna terbaik didapatkan pada dosis aluminium sulfat 1500 mg/L, yaitu sebesar 94,1%.

Hasil dari proses koagulasi-flokulasi limbah batik dengan koagulan aluminium sulfat pada 100 rpm ditampilkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Hasil Koagulasi-Flokulasi dengan 100 rpm

Keterangan

- (a) Hasil jar test penambahan 500 mg/L aluminum sulfat
- (b) Hasil jar test penambahan 1000 mg/L aluminum sulfat
- (c) Hasil jar test penambahan 1500 mg/L aluminum sulfat
- (d) Hasil jar test penambahan 2000 mg/L aluminum sulfat
- (e) Hasil jar test penambahan 2500 mg/L aluminum sulfat

b) Variasi dosis alum dengan 80 rpm

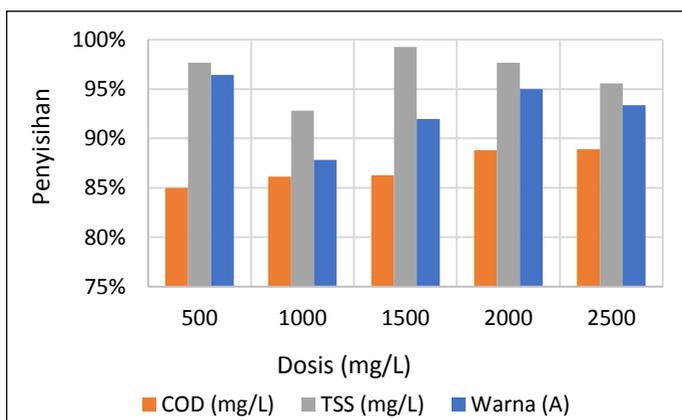
Selanjutnya dilakukan uji jar test menggunakan koagulan alum dengan kecepatan pengadukan koagulasi 80 rpm. Supernatan dari hasil *jar test* diambil dan diuji konsentrasi COD, TSS, dan absorbansi warna diuji sehingga didapatkan efisiensi penyisihan untuk masing-masing parameter. Hasil uji jar test dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Uji Jar Test Aluminium Sulfat dengan 80 rpm

Dosis alum (mg/L)	COD (mg/L)	Penyisihan COD	TSS (mg/L)	Penyisihan TSS	Warna (A)	Penyisihan Warna
500	1300	85,0%	64	97,6%	0,071	96,4%
1000	1200	86,1%	196	92,8%	0,241	87,8%
1500	1190	86,3%	20	99,3%	0,159	92,0%

Dosis alum (mg/L)	COD (mg/L)	Penyisihan COD	TSS (mg/L)	Penyisihan TSS	Warna (A)	Penyisihan Warna
2000	970	88,8%	64	97,6%	0,099	95,0%
2500	960	88,9%	120	95,6%	0,131	93,4%

Dari data tersebut didapatkan grafik efisiensi penyisihan COD, TSS dan warna sebagaimana terlihat pada Gambar 4.8.

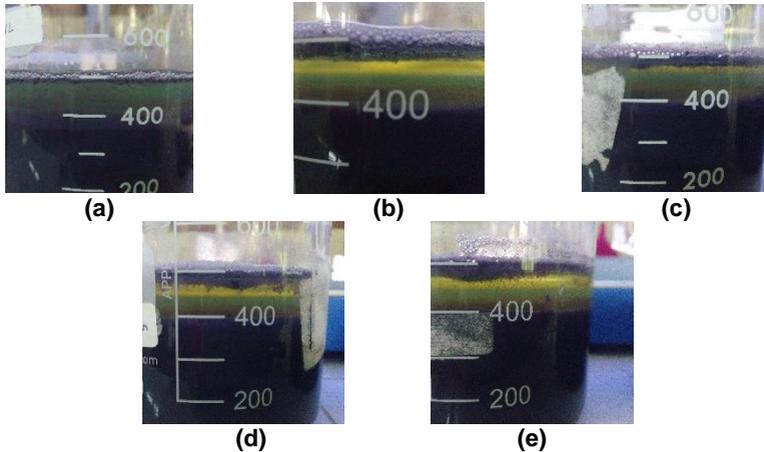


Gambar 4.8 Efisiensi Penyisihan COD, TSS, dan Warna dengan 80 rpm

Hasil *jar test* dengan kecepatan koagulasi 80 rpm menunjukkan bahwa penyisihan terbaik koagulan alum tercapai untuk parameter TSS, berkisar antara 92,8% hingga 99,3%. Hasil tersebut sedikit lebih rendah daripada koagulasi dengan kecepatan 100 rpm, namun cukup signifikan. Penyisihan terbaik kedua terdapat pada konsentrasi warna, dengan efisiensi 87,8% - 96,4%, dan penyisihan COD menghasikan efisiensi terendah dari ketiga parameter yang diuji, yaitu 85,0% - 88,9%. Pada uji *jar test* ini, penyisihan COD terbaik didapatkan dengan dosis aluminium sulfat 2500 mg/L, yaitu sebesar 88,9%. Sementara itu, penyisihan TSS terbaik dicapai pada 99,3% dengan dosis aluminium sulfat 1500 mg/L. Hasil akhir nilai COD adalah 960 mg/L dan TSS adalah 20 mg/L. Pada uji *jar test* 80 rpm, ditemukan bahwa penyisihan

COD meningkat secara proporsional terhadap peningkatan dosis koagulan. Sementara itu, penyisihan warna terbaik didapatkan pada dosis aluminium sulfat 500 mg/L, yaitu sebesar 96,4%.

Hasil dari proses koagulasi-flokulasi limbah batik dengan koagulan aluminium sulfat pada 80 rpm ditampilkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Hasil Koagulasi-Flokulasi dengan 80 rpm

Keterangan

- (a) Hasil jar test penambahan 500 mg/L aluminium sulfat
- (b) Hasil jar test penambahan 1000 mg/L aluminium sulfat
- (c) Hasil jar test penambahan 1500 mg/L aluminium sulfat
- (d) Hasil jar test penambahan 2000 mg/L aluminium sulfat
- (e) Hasil jar test penambahan 2500 mg/L aluminium sulfat

Koagulasi dengan kecepatan 80 rpm menghasilkan efisiensi penyisihan COD dan TSS yang lebih kecil dibandingkan koagulasi dengan kecepatan 100 rpm, meskipun efisiensi penyisihan warna lebih besar. Nilai akhir TSS penyisihan terbaik pada kecepatan koagulasi 100 rpm dan 80 rpm secara berturut-turut adalah 12 mg/L dan 20 mg/L. Penyisihan terbaik konsentrasi warna pada koagulasi 100 rpm adalah 94,1% dan pada koagulasi 80 rpm adalah 96,4%. Namun, hasil terbaik penyisihan warna pada koagulasi 80 rpm tercapai untuk dosis koagulan alum 500 mg/L, dimana penyisihan COD hanya 85,0% dengan hasil akhir COD

1300 mg/L. Pada tahap pengolahan ini, penyisihan COD yang tinggi lebih diutamakan untuk mengurangi kandungan organik pada air limbah sebelum memasuki tahap pengolahan biologis. Perbedaan penyisihan COD dari kedua uji *jar test* cukup signifikan, dimana nilai akhir COD dengan kecepatan koagulasi 80 rpm adalah 960 mg/L, sementara nilai akhir COD dengan kecepatan koagulasi 100 rpm adalah 360 mg/L. Maka dapat disimpulkan bahwa kecepatan koagulasi 100 rpm lebih efektif dibandingkan dengan koagulasi 80 rpm.

Selain itu, diamati pula bahwa penambahan koagulan alum diatas 2000 mg/L menghasilkan flok yang tidak mengendap sepenuhnya. Pada Gambar 4.7 dan 4.8 dapat dilihat bahwa pada dosis koagulan 2500 mg/L, flok yang telah terbentuk mulai naik ke permukaan supernatan. Menurut Malik (2018) dosis koagulan yang berlebih dapat menyebabkan pembalikan muatan flok dan restabilisasi partikel. Dosis koagulan yang melebihi optimum menghasilkan penyisihan yang lebih rendah.

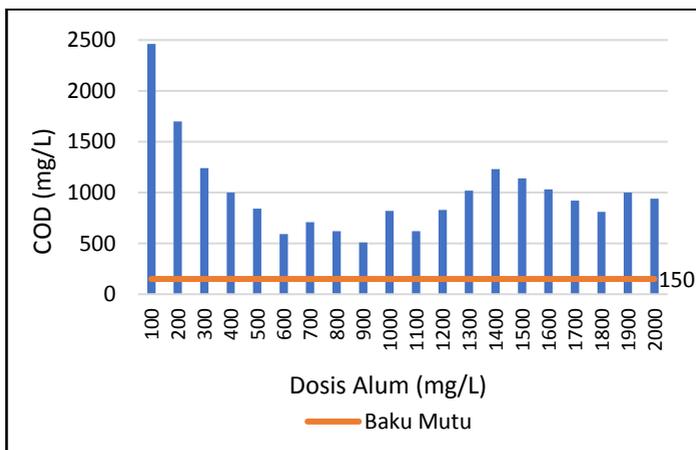
c) Variasi dosis alum baru dengan 100 rpm

Hasil kedua uji *jar test* tidak menunjukkan nilai optimum untuk dosis koagulan melihat hasil efisiensi yang tidak membentuk suatu tren kenaikan atau penurunan. Efisiensi penyisihan yang dihasilkan antar variasi dosis cenderung naik-turun. Kondisi awal pH pada air limbah sangat mempengaruhi proses koagulasi. Nilai pH limbah awal yang bersifat alkali berada diluar rentang pH optimum aluminium sulfat, sehingga mempengaruhi proses destabilisasi partikel, netralisasi muatan dan pembentukan flok. Penambahan dosis koagulan dengan rentang konsentrasi yang cukup jauh berbeda dapat mempengaruhi proses kimiawi yang terjadi secara berbeda-beda. Menurut Aziz, *et al.* (2007) pengaruh pH terhadap koagulasi kimia dan flokulasi adalah keseimbangan antara dua faktor berlawanan, yaitu (1) kekuatan H⁺ dan produk hidrolisis logam dalam interaksi dengan ligan organik, dan (2) kekuatan ion hidroksida dan anion organik dalam berinteraksi dengan produk hidrolisis logam.

Oleh karena itu, diharapkan dengan rentang variasi dosis koagulan yang lebih kecil, dapat ditemukan suatu tren yang menunjukkan nilai optimum dosis koagulan meskipun tidak diberlakukan pengondisian pH pada air limbah.

Dilakukan kembali uji jar test dengan variasi dosis yang berbeda. Pada uji jar test ini digunakan kecepatan koagulasi 100 rpm karena uji sebelumnya membuktikan bahwa koagulasi 100 rpm menghasilkan penyisihan yang lebih baik. Uji jar test ini menggunakan variasi dosis aluminium sulfat dengan selisih yang lebih kecil dan dosis awal yang lebih sedikit. Hal ini dilakukan agar dapat dilihat pengaruh perubahan konsentrasi alum terhadap proses koagulasi air limbah batik dengan defiasi yang lebih kecil. Dengan perbedaan konsentrasi alum yang lebih kecil, diharapkan dapat dihasilkan kurva efisiensi penyisihan yang baik.

Dosis aluminium sulfat yang digunakan adalah dalam rentang 100 mg/L – 2000 mg/L dengan selisih 100 mg/L antara setiap dosisnya. Percobaan ini dilakukan secara duplo. Kualitas air limbah yang dihasilkan dari pengolahan dengan uji jar test ditunjukkan pada Gambar 4.10 untuk konsentrasi COD dan Gambar 4.11 untuk konsentrasi TSS.

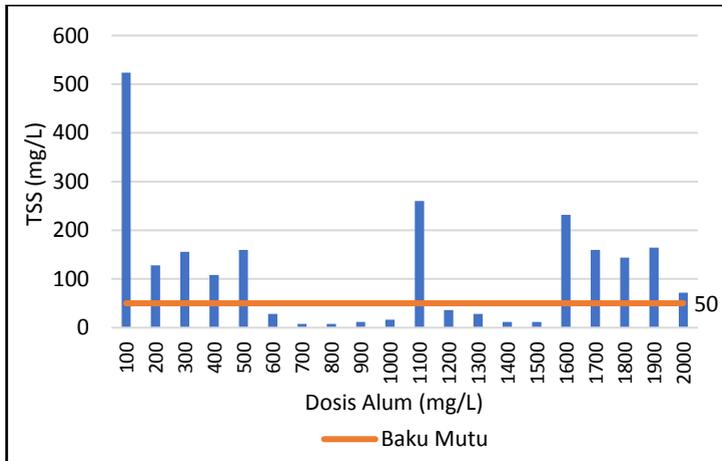


Gambar 4.10 Konsentrasi COD Hasil Penyisihan Oleh Aluminium Sulfat

Grafik pada Gambar 4.10 menunjukkan bahwa secara keseluruhan, penambahan dosis alum yang lebih tinggi menghasilkan konsentrasi COD air limbah yang lebih rendah. Dapat dilihat bahwa dosis alum 900 mg/L menghasilkan efluen dengan konsentrasi COD terendah, yaitu sebesar 510 mg/L.

Sementara itu, dosis alum diatas 1000 mg/L menghasilkan konsentrasi COD yang lebih tinggi seiring dengan meningkatnya dosis koagulan. Hal ini terjadi karena penambahan koagulan yang berlebih menyebabkan pembalikan muatan yang mengakibatkan restabilisasi padatan flok yang telah terbentuk dan tersuspensi. Restabilisasi suspensi flok juga berkaitan dengan zeta potensial pada partikel koloid (Aktas *et al.*, 2013). Seiring dengan meningkatnya penambahan koagulan, zeta potensial yang bernilai negatif semakin mendekati nol. Konsentrasi koagulan dimana zeta potensial mencapai nilai nol disebut sebagai titik *iso-electric*. Kemudian, dengan bertambahnya konsentrasi koagulan, resultan muatan pada partikel menjadi positif (zeta potensial positif). Koagulan yang berlebih menyebabkan proses koagulasi yang tidak efektif dan pembentukan flok yang tidak maksimal.

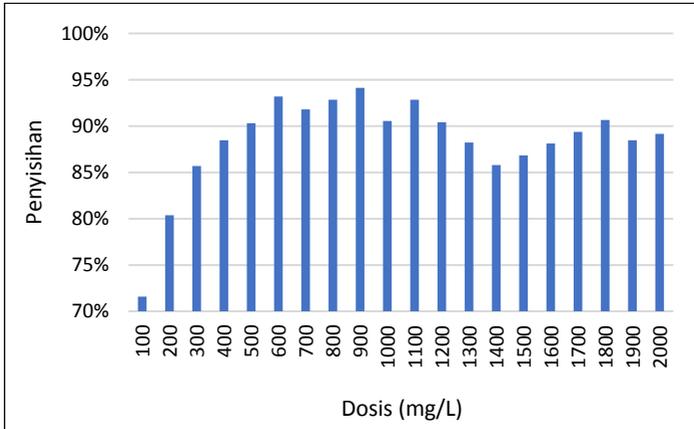
Hasil efluen konsentrasi COD terendah, yaitu 510 mg/L, belum memenuhi baku mutu dimana batas maksimum COD adalah 150 mg/L, sehingga perlu dilakukan pengolahan lanjutan.



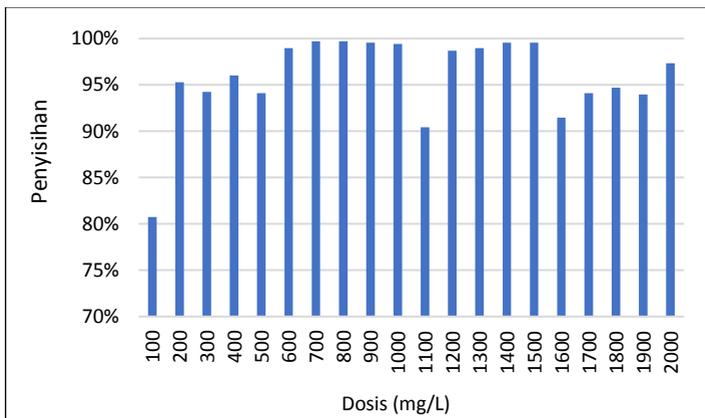
Gambar 4.11 Konsentrasi TSS Hasil Penyisihan Oleh Aluminium Sulfat

Gambar 4.11 menunjukkan bahwa koagulasi menggunakan aluminium sulfat menghasilkan efluen konsentrasi TSS yang cukup baik. Pada dosis alum 800 mg/L, didapatkan efluen konsentrasi TSS sebesar 8 mg/L. Nilai tersebut sudah memenuhi

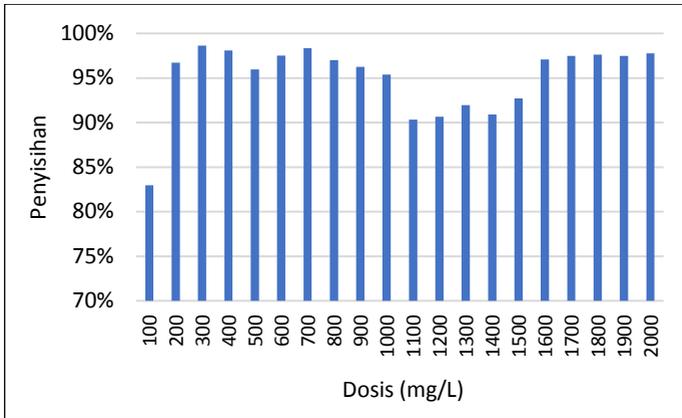
baku mutu dimana batas maksimum TSS adalah 50 mg/L. Hasil uji jartest dalam bentuk efisiensi penyisihan COD, TSS, dan warna dapat dilihat dalam bentuk grafik pada Gambar 4.12, Gambar 4.13, dan Gambar 4.14.



Gambar 4.12 Efisiensi Penyisihan COD Oleh Aluminium Sulfat



Gambar 4.13 Efisiensi Penyisihan TSS Oleh Aluminium Sulfat



Gambar 4.14 Efisiensi Penyisihan Warna Oleh Aluminium Sulfat

Data nilai konsentrasi efluen untuk tiap parameter dan efisiensi penyisihan hasil uji jar test 100 rpm dengan variasi dosis alum baru secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran B. Dari grafik pada Gambar 4.10 hingga Gambar 4.14, dapat dilihat bahwa efisiensi penyisihan optimum untuk parameter COD adalah 94,1% dengan nilai COD akhir 510 mg/L. Efisiensi penyisihan TSS mencapai titik optimum pada 99,7% dengan nilai TSS akhir 8 mg/L, dan titik optimum efisiensi penyisihan warna adalah 98,6%. Dosis optimum alum yang didapatkan untuk penyisihan COD adalah 900 mg/L, untuk penyisihan TSS 800 mg/L, dan untuk penyisihan warna 300 mg/L.

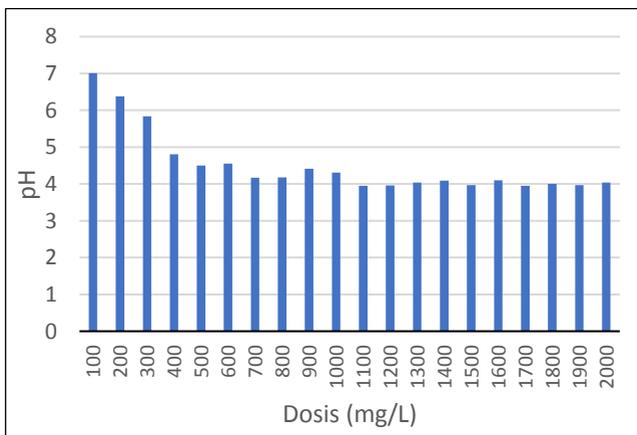
Dari hasil tersebut, maka terpilih dosis optimum aluminium sulfat sebesar 900 mg/L untuk digunakan pada tahap penelitian selanjutnya. Dosis aluminium sulfat 900 mg/L dapat menyisihkan COD sebanyak 94,1% (nilai akhir 510 mg/L), TSS sebanyak 99,6% (nilai akhir 12 mg/L) dan warna sebanyak 96,3% (nilai akhir 0,074 A pada panjang gelombang 530 nm). Pada dosis tersebut dihasilkan penyisihan tertinggi adalah untuk parameter TSS, kemudian warna, lalu penyisihan terendah adalah parameter COD. Hasil tersebut sesuai dengan temuan Asif, *et al.* (2016) dimana koagulasi menggunakan lumpur alum untuk mengolah limbah tekstil menghasilkan penyisihan tertinggi hingga terendah secara berturut-turut adalah parameter TSS, warna dan COD (96,5%,

85,5%, dan 58%). Dosis alum 900 mg/L dinilai cukup baik untuk mengolah limbah batik dalam proses koagulasi-flokulasi sebagai *pre-treatment* sebelum pengolahan lanjutan dengan proses fitoremediasi dan bioaugmentasi.

d) Analisis pH Uji Jar Test

Analisis pH sebelum dan sesudah uji Jar Test bertujuan untuk mengetahui derajat keasaman air limbah pada proses pengolahan. Dalam penelitian ini pH digunakan sebagai parameter pendukung dikarenakan pH air limbah mempengaruhi kemampuan pengolahan kimiawi maupun biologis. pH awal air limbah bernilai 9,63 menandakan air limbah bersifat basa. pH tersebut berada diluar rentang yang dapat diterima oleh tumbuhan, dan juga berada diluar pH optimum koagulan alum.

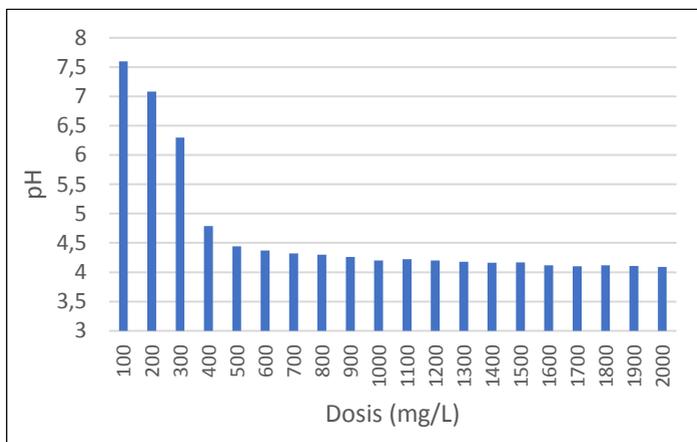
Penambahan koagulan alum pada air limbah menyebabkan penurunan pH yang cukup drastis. Pengukuran pH setelah penambahan dosis alum sebanyak 100 mg/L – 2000 mg/L dapat dilihat pada Gambar 4.15 dan data secara lengkap terdapat pada Lampiran B.



Gambar 4.15 Nilai pH Setelah Penambahan Koagulan Alum

Dari grafik pada Gambar 4.15 terlihat bahwa semakin banyak penambahan koagulan alum, semakin turun pH air limbah. pH air limbah setelah penambahan alum berkisar antara 3,95 –

7,01. Proses koagulasi-flokulasi yang terjadi juga berpengaruh terhadap pH efluen air limbah yang dihasilkan. Gambar 4.16 menunjukkan hasil pengamatan pH air limbah setelah dilakukan uji jar test dengan koagulan alum pada kecepatan 100 rpm.



Gambar 4.16 Nilai pH Setelah Uji Jar Test 100 rpm

Data nilai pH setelah uji jar test secara lengkap terdapat pada Lampiran B. Berdasarkan grafik pada Gambar 4.16, dapat dilihat bahwa pH setelah proses koagulasi-flokulasi sedikit meningkat namun tidak jauh berbeda dengan sebelum pengolahan. Kisaran pH hasil pengolahan air limbah adalah 4,09–7,6. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa proses koagulasi-flokulasi dengan koagulan alum menyebabkan air limbah yang bersifat basa menjadi asam.

Menurut El-Gendy *et al.* (2004), pH diatas 8,0 dan dibawah 4,0 menghambat proses pertumbuhan eceng gondok. Meskipun eceng gondok tetap dapat bertahan hidup pada pH diluar rentang 4,0–8,0, namun pH optimum untuk pertumbuhan adalah 5,8–6,0. Maka dari itu proses koagulasi-flokulasi cocok sebagai *pre-treatment* dari proses fitoremediasi karena pH air limbah diturunkan sehingga lebih mendekati rentang optimum yang dapat diterima oleh eceng gondok.

4.2.4 Range Finding Test

Tahap range finding test menggunakan air limbah dari hasil proses koagulasi-flokulasi pada reaktor. Variasi konsentrasi air limbah terhadap hasil proses tersebut adalah 100%, 75%, 50%, 25%, 10%, dan kontrol 0%. Proses pengolahan pada tahap koagulasi-flokulasi menghasilkan konsentrasi COD sebesar 510 mg/L. Sehingga variasi konsentrasi COD yang dihasilkan adalah 510 mg/L, 382,5 mg/L, 255 mg/L, 127,5 mg/L, 51 mg/L, dan 0 mg/L. Air limbah hasil pengolahan koagulasi-flokulasi bersifat asam, sehingga dilakukan pembubuhan kapur (CaCO_3) untuk meningkatkan nilai pH agar mencapai rentang pH optimum pertumbuhan eceng gondok, yaitu 5,8 – 6,0 (El-Gendy *et al.*, 2004).

Pada tahap RFT dilakukan pengamatan terhadap kondisi fisik eceng gondok selama 7 hari dan diuji parameter COD, TSS dan warna pada awal dan akhir proses RFT. Berat eceng gondok untuk setiap reaktor ditentukan dengan perhitungan terhadap densitas eceng gondok dan volume air limbah yang digunakan. Berikut adalah perhitungannya:

$$\begin{aligned}\text{Massa } E. \text{ crassipes} &= \text{densitas } E. \text{ crassipes} \times \text{volume air} \\ &= 0,02 \text{ g/cm}^3 \times 3000 \text{ cm}^3 \\ &= 60 \text{ g}\end{aligned}$$

Maka diambil eceng gondok dengan umur dan ukuran yang serupa dan ditimbang hingga mencapai berat 60 g untuk dimasukkan ke dalam setiap reaktor RFT. Dapat diketahui pula kerapatan tumbuhan dalam reaktor. Berikut adalah perhitungan kerapatan tumbuhan:

$$\begin{aligned}\text{Kerapatan tumbuhan} &= \frac{\text{berat tumbuhan}}{\text{luas reaktor}} \\ &= \frac{60 \text{ g}}{380,13 \text{ cm}^2} \\ &= 0,16 \text{ g/cm}^2\end{aligned}$$

Dari penelitian pendahuluan ini didapatkan hasil pengamatan kondisi fisik eceng gondok selama 7 hari pengolahan sebagaimana disajikan pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.17

Tabel 4.4 Hasil Pengamatan Range Finding Test

Konsentrasi COD (mg/L)	Waktu pemaparan (hari)							
	0	1	2	3	4	5	6	7
510	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat, beberapa daun menguning	Sehat, beberapa daun layu	Sehat, beberapa daun layu
382	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat, beberapa daun menguning	Sehat, beberapa daun layu	Sehat, beberapa daun layu
255	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat
127	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat
51	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat
0	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat	Sehat



(a) COD 0 mg/L hari-1



(h) COD 0 mg/L hari-5



(i) COD 0 mg/L hari-7



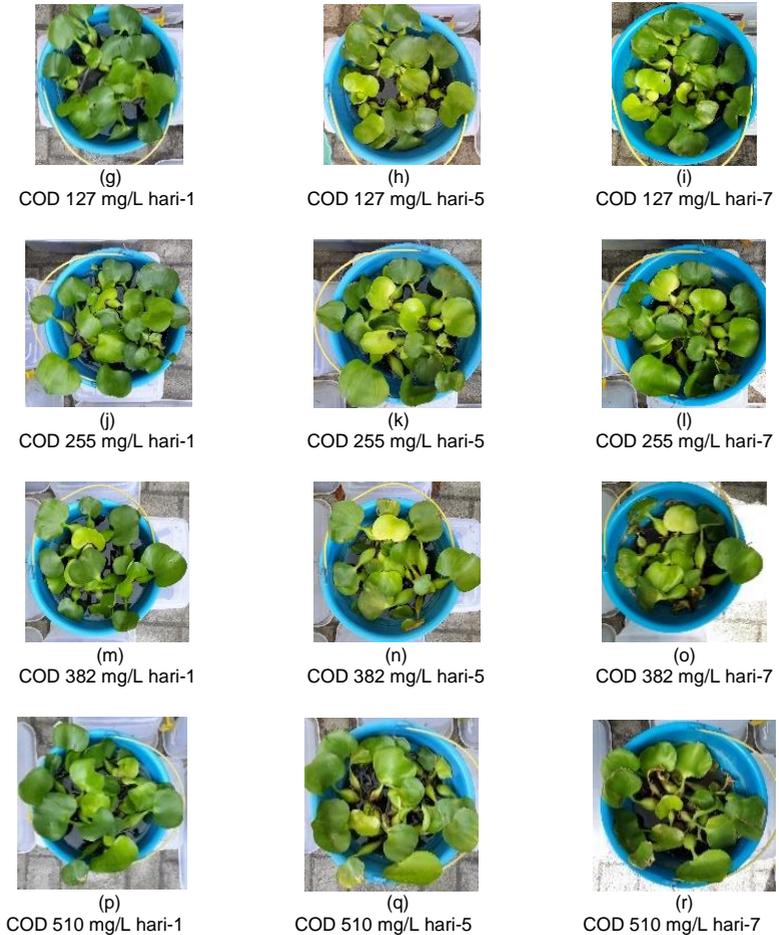
(g) COD 51 mg/L hari-1



(h) COD 51 mg/L hari-5



(i) COD 51 mg/L hari-7

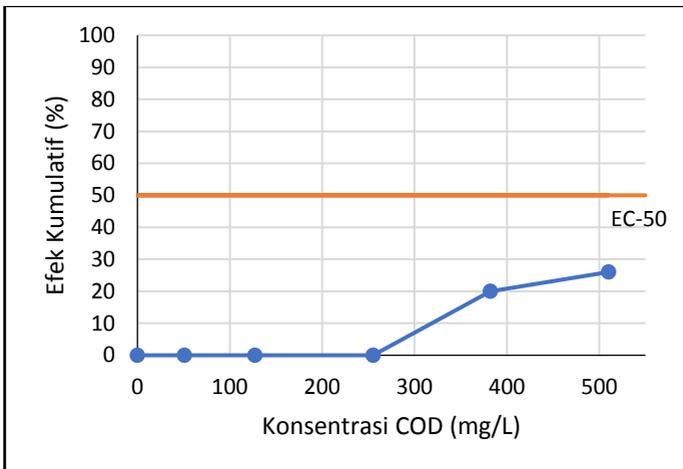


Gambar 4.17 (a-r) Hasil Pengamatan RFT Hari ke-1, ke-5, dan ke-7 dengan Variasi Konsentrasi COD

Data pada Tabel 4.4 menunjukkan hasil pengamatan selama 7 hari terhadap pertumbuhan dan kondisi fisik eceng gondok yang terpapar limbah pada 5 konsentrasi yang berbeda. Dapat dilihat bahwa hingga hari ke-4, tumbuhan pada setiap level

konsentrasi tumbuh sehat dan segar. Tidak terlihat efek toksik atau efek akut pada semua reaktor. Pada hari ke-5, tumbuhan terpapar konsentrasi COD 510 mg/L dan 382 mg/L mulai menunjukkan perubahan fisiologis yaitu sejumlah daun yang mulai menguning. Pada hari ke-6 dan di akhir hari ke-7, beberapa daun pada kedua reaktor tersebut layu, namun keseluruhan tumbuhan tetap tumbuh dan sehat.

Efek kumulatif dari konsentrasi COD 510 mg/L dan 383 mg/L tidak begitu signifikan, dengan jumlah daun yang layu sebanyak masing-masing 20% dan 26%. Dari pengamatan tersebut dapat dibuat kurva konsentrasi COD terhadap respons tumbuhan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Efek COD terhadap eceng gondok (kurva konsentrasi-respons)

Dari kurva pada Gambar 4.18 dapat dilihat bahwa 510 mg/L tidak mencapai nilai EC_{50} yang menyebabkan efek akut signifikan terhadap pertumbuhan eceng gondok. Maka dari itu disimpulkan bahwa 510 mg/L termasuk dalam konsentrasi COD yang dapat diterima oleh eceng gondok. Konsentrasi tersebut dapat digunakan dalam uji pengolahan biologis oleh eceng gondok dengan bioaugmentasi *P. aeruginosa*.

4.3 Pengolahan Air Limbah Batik oleh Bioaugmentasi *E. crassipes* dengan *P. aeruginosa*

Penelitian utama yang pertama dilakukan untuk menentukan efisiensi penyisihan BOD, COD, TSS dan warna pada air limbah batik secara fitoremediasi. Proses pengolahan biologis ini menggunakan bioaugmentasi bakteri *P. aeruginosa* terhadap tumbuhan eceng gondok. Pengolahan biologis dilakukan setelah air limbah telah melewati pengolahan koagulasi-flokulasi. Diagram alir proses dan karakteristik air limbah pada *pre-treatment* dapat dilihat pada Gambar 4.19



Gambar 4.19 Diagram Alir Proses Koagulasi-Flokulasi

Rasio BOD/COD efluen proses koagulasi-flokulasi adalah 0,14. Hal tersebut menunjukkan bahwa kemampuan biodegradasi limbah perlu ditingkatkan. Akar tumbuhan mengeluarkan eksudat seperti asam organik, fenol, enzim dan protein dengan tingkat biodegradasi yang tinggi (Mangkoedihardjo, 2006). Campuran antara limbah dengan rasio BOD/COD yang rendah dan akar tumbuhan yang dapat menghasilkan bahan organik dengan rasio BOD/COD tinggi dapat meningkatkan tingkat biodegradasi dari air limbah tersebut. Mangkoedihardjo (2006) menemukan bahwa eceng gondok dapat meningkatkan rasio BOD/COD sebanyak 0,30 pada air limbah dengan COD lebih dari 500 mg/L dengan rasio BOD/COD awal $\pm 0,1$. Sementara untuk COD kurang dari 500 mg/L, rasio BOD/COD dapat ditingkatkan sebanyak 0,33 – 0,52.

Sebelum eceng gondok dimasukkan ke dalam reaktor, pH dan nutrisi yang terdapat pada air limbah dianalisis agar dapat disesuaikan. Jumlah nutrisi (N, P dan K) dan nilai pH dikondisikan agar mendukung pertumbuhan optimum eceng gondok dan bakteri *P. aeruginosa*. Nutrisi berupa N (NH_4Cl), P (TSP), dan K (KCl)

ditambahkan ke dalam air limbah agar rasio C:N:P:K setara dengan 100:10:1,5:26 (Gupta *et al.*, 2012). Konsentrasi COD pada air limbah adalah 510 mg/L, sehingga untuk mencapai rasio yang diinginkan, konsentrasi N, P, dan K yang diperlukan masing-masing adalah 51 mg/L, 7,65 mg/L dan 132,6 mg/L. Didapatkan hasil analisis konsentrasi amonium pada air limbah 4,56 mg/L, konsentrasi fosfat 0,04 mg/L, dan konsentrasi kalium 0,26 mg/L. Sehingga untuk mencapai konsentrasi N, P, dan K yang diinginkan perlu ditambahkan 1,51 g NH₄Cl, 1,13 g TSP, dan 4,32 g KCl.

Air limbah memiliki pH tergolong asam, maka pH disesuaikan hingga rentang 5,8 – 6,0 dengan penambahan kapur (CaCO₃) untuk mencapai pH optimum pertumbuhan eceng gondok (El-Gendy *et al.*, 2004). CaCO₃ ditambahkan dalam bentuk serbuk sebanyak ±300 gr ke dalam masing-masing reaktor. Setelah penambahan kapur, diamati bahwa warna air limbah menjadi sedikit keruh. Mengukuran pH dilakukan 5-10 menit setelah penambahan dan pengadukan kapur ke dalam reaktor.

Untuk mengetahui banyaknya eceng gondok yang digunakan pada setiap reaktor pada uji pengolahan, dilakukan perhitungan berat eceng gondok yang diperlukan. Perhitungan dilakukan berdasarkan volume air dan densitas eceng gondok (Herrena, 2017). Volume air limbah yang digunakan adalah 15 L. Berikut adalah perhitungan massa eceng gondok:

$$\begin{aligned} \text{Massa } E. \text{ crassipes} &= \text{densitas } E. \text{ crassipes} \times \text{volume air} \\ &= 0,02 \text{ g/cm}^3 \times 15000 \text{ cm}^3 \\ &= 300 \text{ g} \end{aligned}$$

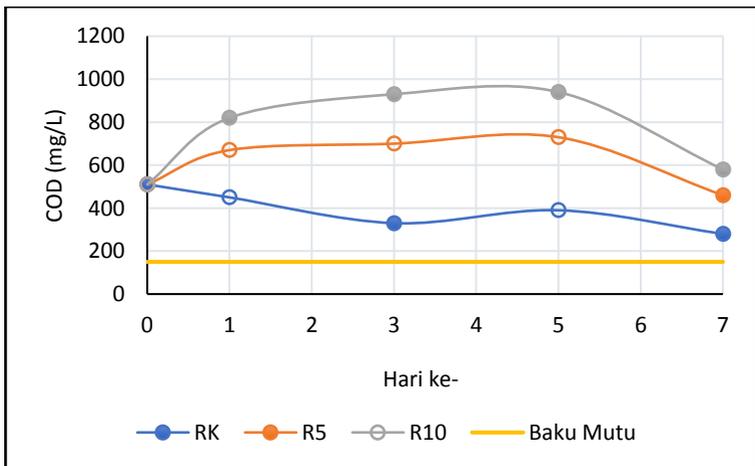
Maka diambil eceng gondok dengan umur dan ukuran yang serupa dan ditimbang hingga mencapai berat 300 g untuk dimasukkan ke dalam setiap bioreaktor. Dapat diketahui pula kerapatan tumbuhan dalam reaktor. Berikut adalah perhitungan kerapatan tumbuhan:

$$\begin{aligned} \text{Kerapatan tumbuhan} &= \frac{\text{berat tumbuhan}}{\text{luas reaktor}} = \frac{300 \text{ g}}{24,5 \text{ cm} \times 38 \text{ cm}} \\ &= 0,32 \text{ g/cm}^2 \end{aligned}$$

Pada masing-masing bioreaktor, pengambilan sampel dilakukan dengan mengambil air limbah pada 10 titik dengan letak dan kedalaman yang berbeda. Dari setiap reaktor diambil sampel sebanyak 50 mL.

4.3.1 Analisis Parameter COD

Dalam penelitian ini, analisis COD dilakukan pada limbah batik dalam reaktor uji dengan bakteri 5% (R5), reaktor uji dengan bakteri 10% (R10) dan reaktor kontrol (RK). Pengolahan biologis berlangsung selama 7 hari dan nilai COD air limbah diamati setiap 2 hari pada hari ke-1, ke-3, ke-5, dan ke-7 proses pengolahan. Hasil analisis nilai COD dari reaktor uji dan reaktor kontrol dapat dilihat pada Gambar 4.20.



Gambar 4.20 Nilai COD Pada Bioreaktor

Berdasarkan hasil pengamatan pada Gambar 4.19, dapat dilihat bahwa nilai COD pada R5 dan R10 meningkat secara perlahan. Setelah satu hari, nilai COD meningkat dari 510 mg/L menjadi 670 mg/L pada R5 dan 820 mg/L pada R10. Peningkatan tersebut berlanjut hingga hari ke-5, setelah itu COD mulai turun. Pada hari ke-7, R10 memiliki nilai akhir COD 580 mg/L dan R5 mampu menurunkan COD hingga 460 mg/L. Sehingga diketahui bahwa eceng gondok dengan 5% bioaugmentasi bakteri dapat menyisihkan COD sebanyak 9,8% dalam waktu 7 hari.

Reaktor kontrol tanpa penambahan bakteri, RK, berhasil menurunkan konsentrasi COD hingga 450 mg/L dalam waktu satu

hari. Penurunan tersebut berlanjut hingga hari ke-3, yaitu mencapai COD 330 mg/L. Pada akhir masa pengolahan (hari ke-7), RK berhasil menyisihkan COD hingga konsentrasi 280 mg/L. Dari data tersebut, diketahui bahwa eceng gondok secara tunggal dapat menyisihkan kandungan organik berupa COD sebanyak 35,29% dalam waktu 3 hari, dan 45,1% dalam waktu 7 hari dari konsentrasi awal 510 mg/L.

Menurut Reddy (1981), keberadaan tanaman pada air limbah menyebabkan berkurangnya CO₂ terlarut dalam air selama proses fotosintesis berlangsung. Hal ini meningkatkan oksigen terlarut (DO) pada air, sehingga menciptakan kondisi aerob pada air limbah yang mendukung aktifitas bakteri aerob untuk mengurangi BOD dan COD.

Penyisihan nutrisi pada air limbah didapatkan lebih efisien pada tumbuhan dengan umur muda dibandingkan tumbuhan tua. Maka dari itu, sangat penting untuk memanen tumbuhan yang sudah tua secara teratur (*harvesting*). Apabila tumbuhan tidak dipanen dalam jangka waktu tertentu, nutrisi dari dalam tumbuhan akan kembali larut dalam air. Tumbuhan tua yang mati juga dapat menyebabkan kondisi anaerob dalam air (Gupta *et al.*, 2012). Frekuensi panen adalah faktor yang dapat mempengaruhi efisiensi penyisihan. Casabianca dalam Ho (1994) menyatakan bahwa eceng gondok yang dipanen secara teratur mampu mereduksi N dan P dua kali lebih cepat dibandingkan dengan yang tidak dipanen.

Selain itu, peningkatan COD dalam air limbah dapat disebabkan oleh tidak aktifnya bakteri dalam mendegradasi bahan organik. Kadlec dan Wallace (2009) menyatakan, populasi mikroba pada *treatment wetland* tidak dapat terbentuk secara instan, dan periode pertumbuhan beberapa minggu mungkin diperlukan. Bakteri khusus membutuhkan jangka waktu untuk berkembangbiak. Hal ini menyebabkan munculnya periode induksi, dimana penyisihan polutan sangat sedikit atau tidak ada. Disimpulkan juga bahwa bioaugmentasi bisa menjadi cara untuk meningkatkan performa *constructed wetland* namun apabila ketahanan dari unsur pengolah tidak ditentukan, hal tersebut bisa menjadi kendala dalam proses pengolahan.

4.3.2 Analisis Parameter BOD

Analisis BOD dalam penelitian ini menggunakan nilai BOD₅ dan dilakukan terhadap reaktor uji dengan bakteri 5% (R5), reaktor uji dengan bakteri 10% (R10) dan reaktor kontrol (RK) pada awal dan akhir proses pengolahan. Hasil analisis perubahan nilai BOD dari R5, R10 dan RK dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Perubahan Nilai BOD Pada Bioreaktor

Reaktor	BOD (mg/L)		Efisiensi Penyisihan
	Awal	Akhir	
RK	69,7	32	53,6%
R5	69,7	50	27,7%
R10	69,7	37	46,9%

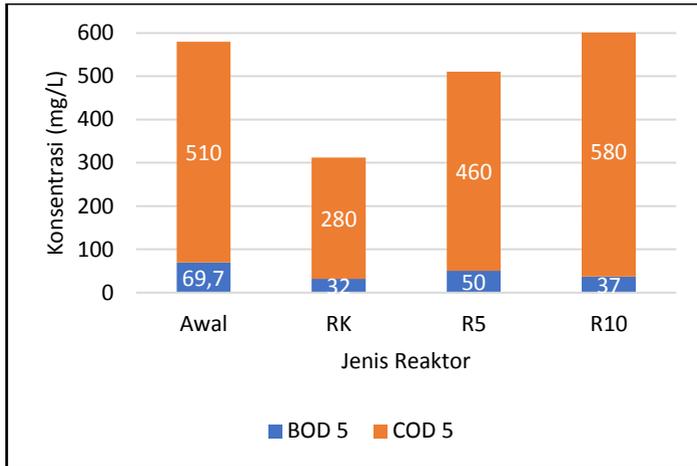
Penyisihan konsentrasi BOD terjadi pada RK sebanyak 53,6%, R5 sebanyak 27,7% dan R10 sebanyak 46,9% dengan konsentrasi akhir masing-masing 32 mg/L, 50 mg/L, dan 37 mg/L. R5 berhasil menyisihkan COD hingga 460 mg/L, namun memiliki penyisihan BOD terkecil. Penyisihan BOD terbaik dicapai oleh RK. Konsentrasi BOD pada akhir pengolahan di semua reaktor telah memenuhi Baku Mutu Air Limbah untuk Industri Tekstil - Peraturan Gubernur Jawa Timur 2013, yaitu 60 mg/L.

Selain proses sedimentasi dan aktivitas mikroba dalam air, suplai oksigen melalui permukaan air dan akar eceng gondok ke dalam air limbah membantu untuk mereduksi konsentrasi BOD (Ho dan Wang, 1994).

4.3.3 Analisis Rasio BOD/COD

Nilai rasio BOD/COD didapatkan dari hasil pengamatan nilai BOD dan COD limbah batik dalam uji pengolahan dengan bioreaktor. Rasio BOD/COD adalah indikator yang umum digunakan untuk tingkat biodegradasi air limbah. Air limbah yang memiliki rasio BOD/COD tinggi dapat dianggap berada dalam kondisi yang memadai untuk berjalannya biodegradasi zat organik (Mangkoedihardjo, 2006). Rasio BOD/COD didapatkan dengan membandingkan nilai BOD dengan nilai COD dari masing-masing

reaktor. Nilai rasio BOD/COD hasil uji pengolahan oleh bioreaktor dapat dilihat pada Gambar 4.21.



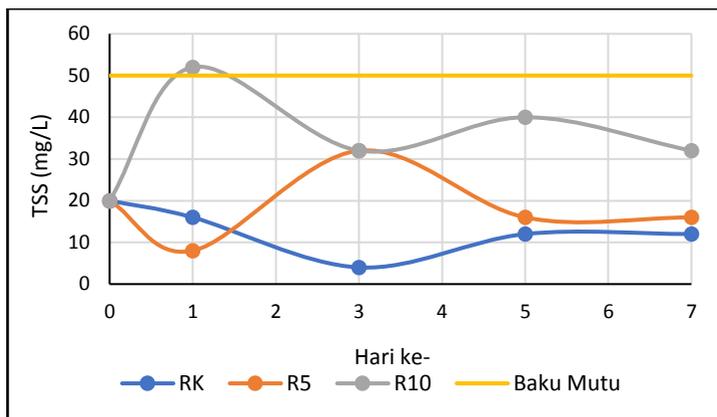
Gambar 4.21 Rasio BOD/COD Pada Bioreaktor

Pada Gambar 4.21 terlihat bahwa rasio BOD/COD pada efluen koagulasi-flokulasi cukup rendah, yaitu 0,14. Rasio tersebut mengalami penurunan setelah proses pengolahan biologis. Rasio BOD/COD pada akhir pengolahan RK adalah 0,12, pada R5 adalah 0,11, dan pada R10 0,06. Hasil analisis BOD dan rasio BOD/COD menunjukkan bahwa bioreaktor eceng gondok dengan dan tanpa bioaugmentasi lebih baik dalam menyisihkan BOD dibandingkan dengan COD.

4.3.4 Analisis Parameter TSS

Analisis TSS dilakukan untuk mengetahui perubahan konsentrasi padatan tersuspensi dalam setiap bioreaktor. Nilai TSS diamati setiap 2 hari selama 7 hari pengolahan untuk reaktor uji dengan bakteri 5% (R5), reaktor uji dengan bakteri 10% (R10) dan reaktor kontrol (RK). TSS yang dihasilkan dari efluen proses koagulasi-flokulasi memiliki konsentrasi sebesar 20 mg/L. Konsentrasi tersebut sudah memenuhi Baku Mutu Air Limbah untuk Industri Tekstil - Peraturan Gubernur Jawa Timur 2013.

Hasil pengamatan nilai TSS dapat dilihat dalam bentuk grafik pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Nilai TSS Pada Bioreaktor

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.22, dapat dilihat bahwa pada awal tahap pengolahan, RK dan R5 mengalami penurunan konsentrasi TSS, sementara R10 mengalami peningkatan yang cukup tinggi. Pada ketiga bioreaktor terjadi fluktuasi jumlah padatan tersuspensi, dikarenakan oleh produksi biomassa yang berbeda setiap harinya.

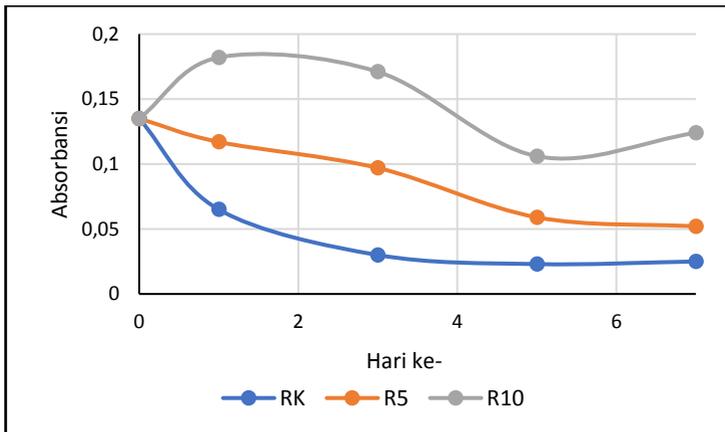
Setelah 1 hari, R5 mampu menyisihkan COD hingga 8 mg/L. Meskipun konsentrasi TSS tersebut mengalami peningkatan, pada hari ke-7 nilai TSS pada R5 adalah 16 mg/L. Dari data tersebut, diketahui bahwa efisiensi penyisihan TSS oleh R5 paling efektif terjadi pada hari ke-1, yaitu sebanyak 60%. Sementara RK mengalami penurunan konsentrasi TSS hingga hari ke-3, dimana terjadi penyisihan sebanyak 80% dengan konsentrasi TSS 4 mg/L. Kemudian TSS meningkat dan stabil pada konsentrasi 12 mg/L hingga hari ke-7.

Setelah 7 hari, RK memiliki konsentrasi TSS terendah yaitu 12 mg/L diikuti oleh R5 dengan 16 mg/L kemudian R10 dengan 32 mg/L. Ketiga hasil akhir tersebut berada di bawah batas maksimum konsentrasi TSS pada Baku Mutu PERGUB Jawa Timur 2013, yaitu 50 mg/L.

Meskipun konsentrasi TSS sudah cukup rendah setelah melalui proses koagulasi-flokulasi, RK dan R5 tetap mampu menyisihkan sebagian dari padatan tersuspensi yang tersisa, masing-masing sebanyak 40% dan 20%. Hal ini dapat terjadi melalui proses penyisihan padatan koloid. Padatan koloid yang sebelumnya tidak dapat mengendap pada proses koagulasi-flokulasi mengalami penyisihan pada bioreaktor melalui beberapa mekanisme. Salah satunya adalah dengan menjadi media bagi pertumbuhan bakteri, kemudian diuraikan oleh mikroba atau mengendap ke dasar air (Polprasert, 2007). 30-90% padatan tersuspensi mengalami penyisihan melalui proses sedimentasi, sementara 26-36% tersisihkan akibat terperangkap dalam akar tumbuhan air (Ho dan Wang, 1994).

4.3.5 Analisis Parameter Warna

Analisis warna air limbah dilakukan pada λ_{maks} 530 nm. Parameter warna dianalisis setiap 2 hari selama 7 hari pengolahan untuk reaktor uji dengan bakteri 5% (R5), reaktor uji dengan bakteri 10% (R10) dan reaktor kontrol (RK). Hasil pembacaan spektrofotometri terhadap warna air limbah (nilai absorbansi) disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Nilai Absorbansi Terkait Warna Pada Bioreaktor

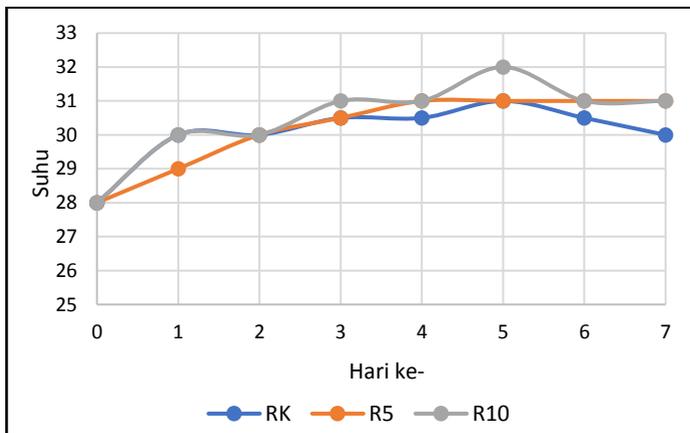
Nilai absorbansi air limbah hasil uji pengolahan dibandingkan dengan absorbansi air limbah awal. Air limbah hasil *pre-treatment* memiliki nilai adsorbansi sebesar 0,135 A. Setelah pengolahan pada bioreaktor, RK dan R5 mengalami penurunan pada absorbansi warna.

Pada hari ke-5 absorbansi pada RK adalah 0,023 A dan pada R5 adalah 0,059. RK mampu menyisihkan warna sebanyak 83%, sementara R5 dapat menyisihkan warna sebanyak 56%. R5 terus mengalami penyisihan warna hingga hari ke-7, dimana absorbansi akhir menunjukkan nilai 0,052 A. Penyisihan warna oleh R5 setelah 7 hari didapatkan sebanyak 61%.

Pada R10 terjadi peningkatan absorbansi di hari ke-1 yang kemudian mengalami penurunan hingga hari ke-5. Pada hari ke-5, warna air limbah pada R10 mencapai nilai 0,106 A, yang apabila dibandingkan dengan nilai absorbansi pada hari ke-0, telah mengalami penurunan sebanyak 21%. Dari data tersebut diketahui bahwa efisiensi penyisihan warna paling efektif untuk R5 adalah 61% pada hari ke-7 dan untuk RK adalah 83% pada hari ke-5.

4.3.6 Analisis Parameter Suhu

Suhu air limbah diamati setiap hari selama 7 hari proses pengolahan untuk reaktor uji dengan bakteri 5% (R5), reaktor uji dengan bakteri 10% (R10) dan reaktor kontrol (RK).

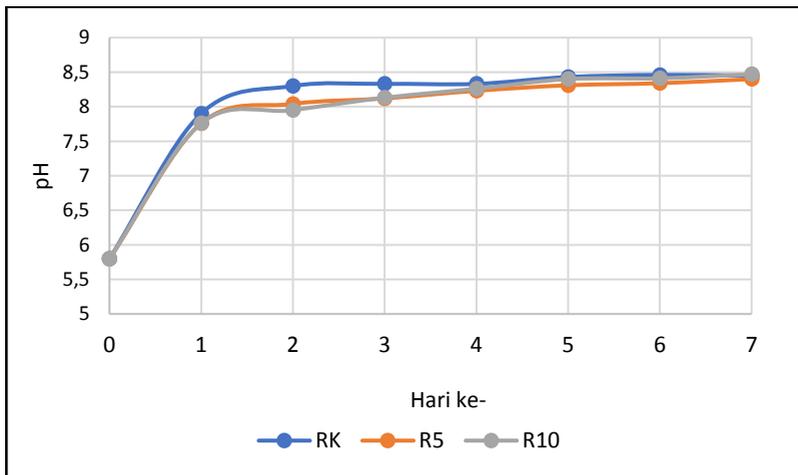


Gambar 4.24 Nilai Suhu Pada Bioreaktor

Hasil pembacaan suhu dapat dilihat pada Gambar 4.24. Terlihat bahwa seiring dengan waktu pengolahan, suhu pada ketiga bioreaktor meningkat secara perlahan. Pada hari ke-5, suhu pada bioreaktor RK dan R5 mencapai 31°C dan pada R10 mencapai 32°C. Zhao *et al.* (2006) menemukan suhu air optimal untuk pertumbuhan eceng gondok adalah 28-30°C. Suhu diatas 33°C menghambat pertumbuhan eceng gondok. Suhu yang hangat dan paparan cahaya matahari meningkatkan densitas, tinggi dan biomassa eceng gondok. Produktivitas eceng gondok dalam paparan air limbah meningkat secara linear terhadap peningkatan temperatur, selama berada dalam rentang 15-35°C (Ho dan Wong, 1994). Sementara itu, *P. aeruginosa* tumbuh optimum pada suhu 37°C, namun dapat tumbuh dengan baik pada suhu 25°C-37°C (Todar, 2012; Rofifah, 2017).

4.3.7 Analisis Parameter pH

Analisis pH air limbah dilakukan setiap hari selama 7 hari proses pengolahan untuk reaktor uji dengan bakteri 5% (R5), reaktor uji dengan bakteri 10% (R10) dan reaktor kontrol tanpa bakteri (RK). Hasil pembacaan pH dapat dilihat pada Gambar 4.25.



Gambar 4.25 Nilai pH Pada Bioreaktor

Menurut El-Gendy *et al.* (2004), eceng gondok tetap dapat bertahan hidup pada pH diluar rentang 4,0–8,0, namun pH optimum untuk pertumbuhan adalah 5,8–6,0. Sementara itu Zhao *et al.* (2006) menemukan bahwa pertumbuhan eceng gondok terbaik pada pH antara 5,5 dan 7,0. Pertumbuhan *P. aeruginosa* optimum pada pH 6,6 – 7,0, meskipun pada pH 8,5 – 9,0 tetap dapat hidup (Todar, 2012).

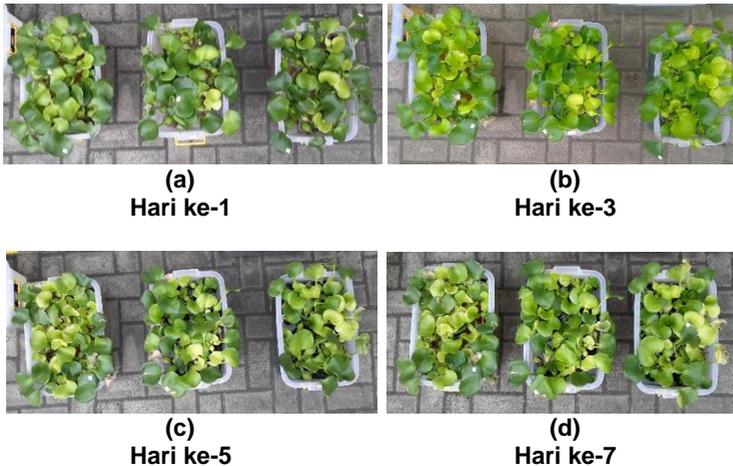
Dari data pada Gambar 4.25 ditemukan bahwa pH pada reaktor RK, R5 dan R10 meningkat secara drastis pada hari pertama dari pH 5,8 mencapai pH netral 7,76 – 7,9. Hal tersebut sesuai dengan pernyataan Gupta *et al.* (2012) bahwa eceng gondok dapat menetralkan pH pada kolam sehingga mendukung perkembangan aktivitas mikroba dalam air untuk mendegradasi BOD dan COD.

Setelah hari pertama pH pada ketiga reaktor meningkat secara perlahan dan cukup stabil antara 8,0 – 8,5. Kenaikan dan penurunan pH pada media air disebabkan oleh keberadaan dan aktivitas bakteri. Aktivitas bakteri dalam memecah senyawa organik menyebabkan terbentuknya asam-asam sederhana dan CO₂ sehingga terjadi penurunan pH (Abat, 2006). Kenaikan pH dalam reaktor RK, R5, dan R10 menjadi indikator bahwa tidak terdapat aktivitas bakteri yang cukup untuk menyebabkan penurunan pH. Menurut Gaudy dan Gaudy (1980), kenaikan pH menandakan bahwa fase pertumbuhan bakteri telah mendekati fase stasioner dan terjadi penumpukan sel mati dari bakteri. Peningkatan pH selama proses pengolahan mengindikasikan aktivitas tumbuhan dalam proses pengolahan. Fotosintesis memanfaatkan karbon dioksida untuk memproduksi oksigen, sehingga menggeser keseimbangan karbonat-bikarbonat-karbon dioksida menuju pH yang lebih tinggi (Kadlec dan Wallace, 2009).

4.3.8 Analisis Morfologi Tumbuhan

Morfologi tumbuhan selama proses pengolahan diamati untuk mengetahui pengaruh air limbah terhadap perkembangan eceng gondok. Tumbuhan eceng gondok yang digunakan dalam pengolahan limbah batik dengan variasi konsentrasi bakteri yang berbeda diamati dan dibandingkan. Dalam analisis ini, karakteristik tumbuhan yang diamati adalah lebar daun, panjang tumbuhan, dan panjang akar. Hasil pengamatan fisik eceng gondok selama proses

pengolahan air limbah batik dilakukan selama 7 hari proses pengolahan biologis. Perubahan fisik eceng gondok pada hari ke-1, ke-3, ke-5 dan ke-7 pengolahan dapat dilihat pada Gambar 4.26.

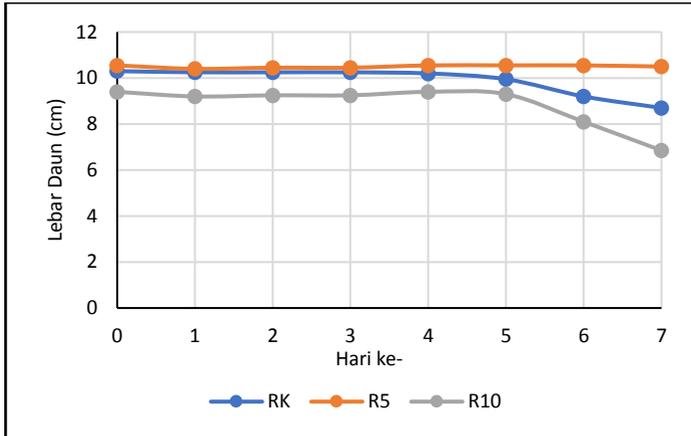


Gambar 4.26 (a-d) Perubahan Fisik Eceng Gondok

Dari pengamatan fisik tersebut, terlihat bahwa tumbuhan eceng gondok dalam ketiga reaktor yang terpapar air limbah tetap bertahan hidup selama 7 hari. Didapatkan beberapa daun yang layu dan menguning, namun tidak mencapai 50% dari populasi uji. Selain pengamatan karakteristik fisik secara kasat mata, dilakukan pengukuran fisiologis tumbuhan yaitu daun, batang, dan akar. Pengukuran lebar daun dilakukan setiap hari selama 7 hari pengolahan biologis. Hasil analisis karakteristik lebar daun dapat dilihat pada Gambar 4.27.

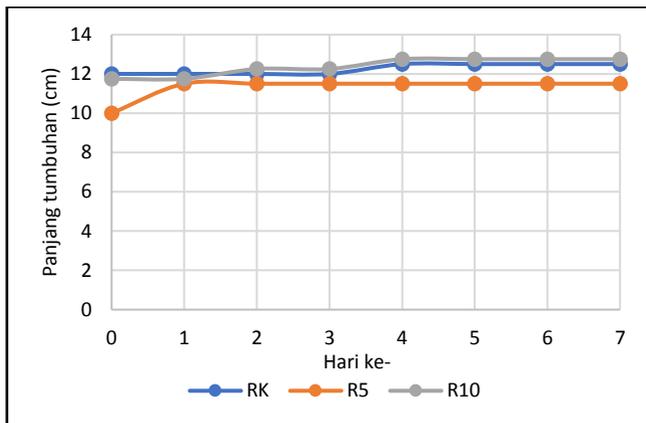
Dari data pengukuran, diketahui bahwa beberapa daun bertambah lebar dan beberapa daun mengalami penyusutan. Maka secara rata-rata perubahan lebar daun tidak terlalu signifikan (stabil). Namun, dapat dilihat pada Gambar 4.27 bahwa pada hari ke-5 hingga hari ke-7, laju penyusutan pada beberapa daun melebihi pertumbuhan pada daun yang lain. Perbedaan lebar daun paling signifikan didapatkan pada R10, dimana rata-rata lebar daun awal adalah 9,4 cm dan pada akhir pengolahan menjadi 6,85 cm. Sementara itu, daun eceng gondok pada R5 mengalami

penyusutan paling sedikit dengan selisih rata-rata lebar daun awal dan akhir adalah 0,05 cm

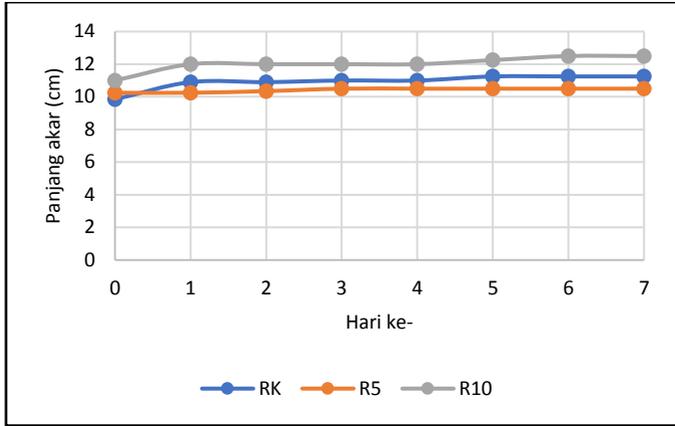


Gambar 4.27 Lebar Daun Eceng Gondok

Perubahan panjang tumbuhan dan panjang akar juga diamati sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.28 dan Gambar 4.29.



Gambar 4.28 Panjang Tumbuhan Eceng Gondok



Gambar 4.29 Panjang Akar Eceng Gondok

Panjang tumbuhan yang diukur merupakan panjang tangkai dari pangkal daun hingga pangkal akar. Data pada Gambar 4.28 menunjukkan bahwa panjang tumbuhan pada R5 mengalami peningkatan paling signifikan pada hari ke-1, sementara RK dan R10 pada hari ke-4. Selisih panjang tumbuhan antara hari ke-0 dengan hari ke-7 pada RK adalah 0,5 cm, pada R5 adalah 1,5 cm, dan pada R10 adalah 1,0 cm. Maka dapat disimpulkan bahwa bioaugmentasi *P. aeruginosa* meningkatkan laju pertumbuhan eceng gondok. Dalam hal ini, interaksi bakteri 5% menghasilkan laju pertumbuhan eceng gondok yang lebih baik dibandingkan interaksi bakteri 10%. Peningkatan panjang tumbuhan menandakan meskipun terpapar air limbah, tetap terjadi pertumbuhan eceng gondok dan proses penyerapan nutrisi. Tangkai daun dianggap sebagai jaringan penyimpanan meskipun tidak seaktif lamina (Ho dan Wong, 1994).

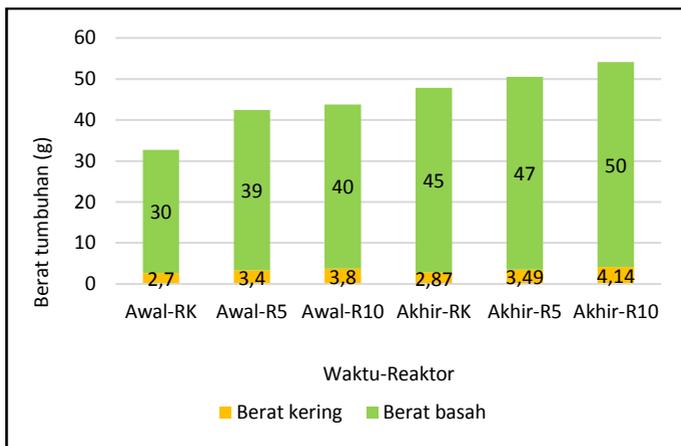
Panjang akar mengalami pertumbuhan paling signifikan dibandingkan dengan daun dan akar, dengan rata-rata selisih penambahan panjang 1,05 cm. R10 memiliki penambahan panjang akar paling besar selama 7 hari, yaitu 1,5 cm. Rata-rata panjang akar adalah 11,1 cm. Selisih panjang akar pada awal dan akhir penelitian pada RK adalah 1,4 cm, pada R5 adalah 0,25 cm, dan pada R10 adalah 1,5 cm. Dari data tersebut diketahui bahwa bioaugmentasi bakteri 10% memberikan efek baik pada

pertumbuhan akar. Ho dan Wong (1994) menemukan bahwa akar eceng gondok rata-rata berukuran 10 cm dan umumnya lebih pendek apabila tumbuh di lingkungan air limbah. Dalam media kaya nutrient seperti air limbah, tumbuhan tidak memerlukan akar yang panjang dan melebar untuk adsorpsi nutrien.

Sudjarwo *et al.* (2014) mengamati perubahan morfologi eceng gondok pada kolam pengolahan limbah domestik, dan menemukan bahwa berat basah dan panjang tangkai bertambah, sementara lebar daun, luas daun, dan panjang akar berkurang. Hal tersebut disebabkan oleh berkurangnya sintesis proten mengakibatkan ukuran sel menjadi lebih kecil atau kegagalan dalam pembelahan sel. Maka organ tumbuhan menciut meskipun terdapat penambahan berat basah.

4.3.9 Analisis Berat Basah dan Berat Kering

Berat basah dan berat kering tumbuhan dianalisis pada awal (hari ke-0) dan akhir (hari ke-7) tahap pengolahan. Selisih berat awal dan akhir dibandingkan untuk mengetahui banyaknya air limbah yang diolah dan diserap oleh tumbuhan serta penambahan biomassa tumbuhan. Hasil pengukuran berat basah dan berat kering RK, R5 dan R10 pada awal dan akhir penelitian terdapat pada Gambar 4.30.



Gambar 4.30 Berat Basah dan Berat Kering Tumbuhan

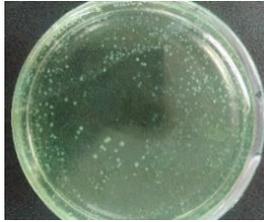
Pada analisis awal, tumbuhan pada RK memiliki rata-rata berat basah 30 g dan berat kering 2,7 g. R5 dan R10 masing-masing memiliki berat basah sebanyak 39 g dan 40 g, sementara berat keringnya adalah 3,4 g dan 3,8 g. Dari data tersebut diketahui bahwa perbandingan berat kering terhadap berat basah pada masing-masing reaktor RK, R5, dan R10 adalah 9%, 8,7% dan 9,5%.

Pada analisis akhir, berat basah RK, R5, dan R10 bertambah menjadi masing-masing 45 g, 47 g, dan 50 g. Penambahan berat basah pada eceng gondok berkisar antara 8 – 15 g. Bioreaktor yang mengalami penambahan berat basah paling banyak adalah RK (15 g). Berat kering bertambah pada setiap reaktor sebanyak 0,17 g pada RK, 0,09 g pada R5, dan 0,34 g pada R10. Reaktor dengan penambahan berat kering paling signifikan adalah R10 sementara untuk berat basah adalah RK.

Peningkatan biomassa menandakan adanya proses penyerapan dan proses metabolik sebagai bagian dari fitodegradasi kontaminan oleh tumbuhan (Pivetz, 2001). Hasil tersebut membuktikan kemampuan eceng gondok dalam bertahan hidup dan merespons terhadap berbagai pencemar lingkungan. Perbedaan respon morfologi juga dipengaruhi oleh perubahan radiasi cahaya matahari dan presipitasi, juga oleh efisiensi absorpsi nutrisi yang mempengaruhi pertumbuhan tumbuhan air (Sudjarwo *et al.*, 2014).

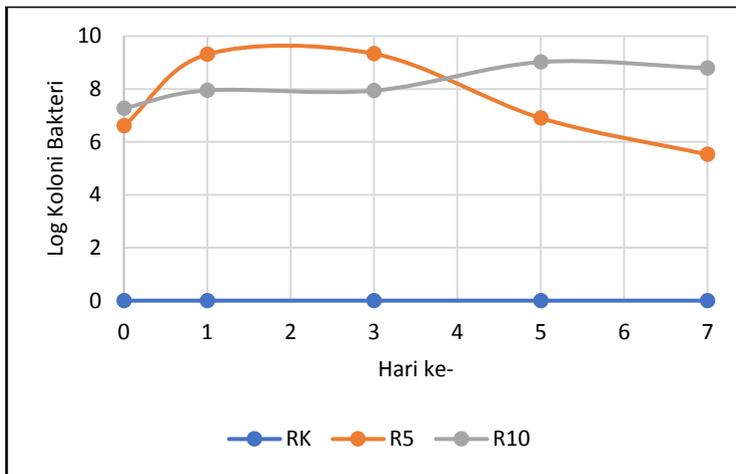
4.3.10 Analisis Colony Forming Unit (CFU)

Uji CFU menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC) untuk mendapatkan pertumbuhan bakteri yang dikehendaki, yaitu *P. aeruginosa*. Sampel air diambil setiap 2 hari pada hari ke-1, ke-3, ke-5 dan ke-7. Media agar yang digunakan adalah media selektif Cetrimid Agar. Media Cetrimid Agar akan berwarna hijau apabila terdapat pertumbuhan bakteri *P. aeruginosa*. Gambar 4.31 menunjukkan hasil dari pertumbuhan koloni *P. aeruginosa* pada media selektif.



Gambar 4.31 Koloni *P. aeruginosa* pada Media Selektif.

Hasil log CFU bakteri *P.aeruginosa* pada RK, R5 dan R10 selama 7 hari pengolahan dapat dilihat pada Gambar 4.32. Data menunjukkan bahwa tidak terdapat bakteri *P. aeruginosa* dalam RK selama periode waktu pengolahan. Hal ini menandakan bahwa *P. aeruginosa* tidak termasuk bakteri *indigenus* pada eceng gondok yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 4.32 Log CFU *P. aeruginosa* pada Bioreaktor

Pada awal penelitian (hari ke-0), ditemukan bahwa R10 memiliki jumlah bakteri tertinggi dengan log CFU 7,27 sementara R5 menunjukkan nilai log CFU 6,6. Meskipun media bakteri yang diinokulasikan ke dalam R10 dua kali lebih banyak dari R5, perbedaan log CFU kedua reaktor tidak terlalu signifikan. R5

mengalami kenaikan jumlah koloni secara pesat pada hari ke-1, sementara pada R10 jumlah koloni bakteri meningkat secara perlahan. Meningkatnya jumlah koloni bakteri menandakan adanya aktivitas perkembangbiakan bakteri.

Selama hari ke-1 hingga ke-3, terlihat bahwa bakteri pada R5 mencapai fase stasioner. Setelah hari ke-3, jumlah koloni bakteri pada R5 berangsur turun, menandakan fase kematian (*decline*). Namun pada hari ke-3 koloni bakteri R10 berangsur naik, menandakan fase log (eksponensial) yang perlahan. Penurunan jumlah koloni pada R5 menandakan berkurangnya pertumbuhan bakteri dan proses perkembangbiakan yang tidak optimal. Hal tersebut dapat disebabkan oleh kurang atau habisnya nutrisi atau senyawa organik dalam medium pada akhir tahap pengolahan (Rofifah, 2017).

Hasil uji CFU selama 7 hari menunjukkan keberadaan dan pertumbuhan bakteri pada reaktor bioaugmentasi (R5 dan R10). Pada hari ke-7, log CFU bakteri pada R5 adalah 5,5, pada R10 adalah 8,79, sementara pada RK tidak ditemukan pertumbuhan bakteri. Hasil tersebut berbanding terbalik dengan penyisihan bahan organik, dimana penyisihan COD berhasil oleh RK dengan efisiensi 45,1% dan R5 dengan efisiensi 9,8%. Data tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi penambahan dan jumlah bakteri dalam sistem bioremediasi justru menurunkan efisiensi penyisihan bahan organik.

BAB 5 KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sejauh ini, didapatkan kesimpulan sementara sebagai berikut:

1. Proses koagulasi-flokulasi dapat mengolah air limbah batik dengan karakteristik konsentrasi pencemar COD 8660 mg/L, BOD 899,1 mg/L rasio BOD/COD 0,1, TSS 2720 mg/L, serta nilai pH sebesar 9,63. Didapatkan dosis koagulan optimum sebanyak 900 mg/L dan kecepatan pengadukan optimum sebesar 100 rpm, dengan efisiensi penyisihan sebagai berikut:
 - Efisiensi penyisihan COD = 94,1%
 - Efisiensi penyisihan BOD = 92,2%
 - Efisiensi penyisihan TSS = 99,6%
 - Efisiensi penyisihan warna = 96,3%
2. Hasil pengolahan limbah batik dengan proses koagulasi-flokulasi menghasilkan efluen dengan konsentrasi COD 510 mg/L, BOD 69,7 mg/L, dan TSS 20 mg/L. Pengolahan biologis dengan eceng gondok dan bioaugmentasi *P. aeruginosa* selama 7 hari memberikan hasil sebagai berikut:
 - Efisiensi penyisihan COD paling efektif pada reaktor uji dengan 5% bakteri adalah 9,8% (hari ke-7) dan pada reaktor tanpa bakteri adalah 45,1% (hari ke-7). Sementara reaktor dengan 10% bakteri tidak dapat menyisihkan COD lebih lanjut.
 - Efisiensi penyisihan BOD setelah 7 hari pengolahan pada reaktor uji dengan 5% bakteri adalah 27,7%, pada reaktor uji dengan 10% bakteri adalah 46,9%, dan pada reaktor tanpa bioaugmentasi adalah 53,6%.
 - Efisiensi penyisihan TSS paling efektif pada reaktor uji dengan 5% bakteri adalah 60% (hari ke-1) dan pada reaktor tanpa bakteri adalah 80% (hari ke-3). Sementara reaktor dengan 10% bakteri tidak dapat menyisihkan TSS lebih lanjut.
 - Efisiensi penyisihan warna paling efektif pada reaktor uji dengan 5% bakteri adalah 61% (hari ke-7), pada reaktor

uji dengan 10% bakteri adalah 21% (hari ke-5), dan pada reaktor tanpa penambahan bakteri adalah 83% (hari ke-5).

Hasil tersebut menunjukkan bahwa secara keseluruhan, proses koagulasi-flokulasi mampu mengolah air limbah batik dengan sangat baik. Setelah dilakukan *pre-treatment*, reaktor eceng gondok tanpa bioaugmentasi bakteri *P. aeruginosa* lebih baik dalam penyisihan seluruh parameter dibandingkan dengan eceng gondok dengan bioaugmentasi. Didapatkan bahwa bioaugmentasi *P. aeruginosa* terhadap eceng gondok kurang cocok untuk mengolah air limbah industri batik.

5.2 Saran

1. Untuk penelitian selanjutnya, dilakukan terlebih dahulu uji potensi bakteri terhadap limbah yang digunakan.
2. Untuk penelitian selanjutnya, dilakukan analisis dalam jangka waktu lebih lama untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal.
3. Sebaiknya dilakukan aklimatisasi tumbuhan pada kondisi yang sesuai dengan tahap pengolahan.
4. Untuk penelitian selanjutnya, nutrisi yang ditambahkan perlu dipertahankan dan dipantau secara terus-menerus.
5. Untuk penelitian selanjutnya, dilakukan analisis pengaruh bioaugmentasi terhadap tumbuhan untuk limbah yang berbeda seperti limbah yang tinggi dalam kandungan nutrisi, hidrokarbon, atau logam berat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abatenh, E., Gizaw, b., Tsegaye, Z., dan Wassie, M. 2017. "Application of microorganisms in bioremediation-review". **Journal of Environmental Microbiology** 1, 1:2-9.
- Abdel-Fatah, M.A., Sherif, H.O., Agour, F., dan Hawash, S.I. 2015. "Textile Waste Water Treatment by Chemical Coagulation Technology". **Global Journal of Advanced Engineering Technologies and Sciences** Vol. 2, No.12.
- Afifah, Y. dan Mangkoediharjo, S. 2018. "Studi Literatur Pengolahan Air Limbah Menggunakan Mixed Aquatic Plants". **Jurnal Teknik ITS** Vol. 7, No. 1.
- Alamsyah, A. 2018. **Kerajinan Batik dan Pewarnaan Alami**. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Afzal, M., Iqbal, S., Rauf, S., dan Khalid, Z.M. 2007. "Characteristics of phenol biodegradation in saline solutions by monocultures of *Pseudomonas aeruginosa* and *Pseudomonas pseudomallei*". **Journal of Hazardous Materials** 194, 60-66.
- Ajao, A.T., Adebayo, G.B., dan Yakubu, S.E. 2011. "Bioremediation of Textile Industrial Effluent using mixed culture of *Pseudomonas aeruginosa* and *Bacillus subtilis* immobilized on agar-agar in a Bioreactor". **Journal of Microbiology and Biotechnology Research** 1, 3:50-56.
- Aktas, T.S., Fujibayashi, M., Maruo, C., Nomura, M., dan Nishimura, O. 2013. "Influence of velocity gradient and rapid mixing time on flocs formed by polysilica iron (PSI) and polyaluminum chloride (PACl)". **Desalination and Water Treatment**, 1-7.
- Anonim. 2018. **Go Botany: New England Wild Flower Society**, <URL: <https://gobotany.newenglandwild.org/species/eichhornia/crassipes/> Diakses pada tanggal: 13 Februari 2019>.
- Asif, M.B., Majeed, N., Iftekhar, S., Habib, R., Fida, S., dan Tabraiz, S. 2016. "Chemically enhanced primary treatment of textile effluent using alum sludge and chitosan". **Desalination and Water Treatment** 57:16.

- Astirin, O.D., dan Winarno, K. 2000. "Peran Pseudomonas dan Khamir dalam Perbaikan Kualitas dan Dekolorisasi Limbah Cair Industri Batik Tradisional". **BioSMART** 2, 1:13-19.
- Aziz, H.A., Alias, S., Assari, F., dan Adlan, M.N. 2007. "The use of alum, ferric chloride, and ferrous sulphate as coagulants in removing suspended solids, colour and COD from semi-aerobic landfill leachate at controlled pH". **Waste Management and Research** 25:556-565.
- Azizah, R.N. 2008. "Deodorisasi Limbah Lateks Pekat dan Dekolorisasi Zat Pewarna Tekstil Secara Enzimatis dengan Formula *Omphalina sp*". **Skripsi**. Bogor: Insititut Pertanian Bogor
- Bidhendi, G.R.N., Torabian, A., Ehsani, H., dan Razmkhah, N. 2007. "Evaluation of Industrial Dyeing Wastewater Treatment with Coagulants and Polyelectrolyte as a Coagulant Aid". **Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering** 4, 1:29-36.
- Brix, H. dan Schierup, H.H. 1989. "The Use of Aquatic Macrophytes in Water-Pollution Control". **AMBIO A Journal of the Human Environment** 18, 2:100-107.
- Center, T. D. dan Spencer, N. R. 1981. "The Phenology and Growth of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) in a Eutrophic North-Central Florida Lake" **Aquatic Botany**, 10, 1-32.
- Dao, C. 2016. **Microbe Wiki**, <URL:https://microbewiki.kenyon.edu/index.php/Pseudomonas_aeruginosa Diakses pada tanggal: 13 Februari 2019>.
- Daranidra, R.F. 2010. "Perancangan Alat Bantu Proses Pencelupan Zat Warna dan Penguncian Warna Pada Kain Batik Sebagai Usaha Mengurangi Interaksi Dengan Zat Kimia dan Memperbaiki Postur Kerja (Studi Kasus di Perusahaan Batik Brotoseno, Masaran, Sragen)". **Naskah Skripsi S1**. Surakarta: Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret.
- Djo, Y.H.W., Suastuti, D.A., Suprihatin, I.E., dan Sulihingtyas, W.D. 2017. "Fitoremediasi Menggunakan Tanaman Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) untuk Menurunkan COD dan kandungan Cu dan Cr Limbah Cair Laboratorium Analitik

- Universitas Udayana". **Cakra Kimia (Indonesian E-Journal of Applied Chemistry)** Vol. 5, No.2.
- Ekpete, O.A. dan Horsfall, M. JNR. 2011. "Preparation and Characterization of Activated Carbon derived from Fluted Pumpkin Stem Waste (*Telfairia occidentalis Hook F*)". **Research Journal of Chemical Sciences** Vol. 1, No. 2.
- El-Gendy, A.S., Biswas, N., dan Bewtra, J.K. 2004. "Growth of Water Hyacinth in Municipal Landfill Leachate with Different pH". **Environmental Technology** 25, 7:833-840.
- EPPA. 2017. "Phytotoxicity assessment". **Efficacy evaluation of plant protection products**. European and Mediterranean Plant Protection Organization.
- Gaudy, A.F. dan Gaudy, E.T. 1980. **Microbiology for Environmental Scientists and Engineers**. USA: McGraw-Hill.
- Guendy, H.R. 2008. "Treatment of Textile Wastewater by Coagulation Using Different Coagulants". **Egyptian Journal of Aquatic Research** 34, 4:53-63.
- Gupta, P., Roy, S., dan Mahindrakar, A.B. 2012. "Treatment of Water Using Water Hyacinth, Water Lettuce and Vetiver Grass – A Review". **Resources and Environment** 2, 5:202-215
- Gutamang, P. 2007. **Sistem Pengelolaan Lingkungan dan Limbah Industri**. Bandung: Yrama Widya.
- Harley, J.P. dan Prescott, L.M. 2002. **Fifth Edition: Laboratory Exercise in Microbiology**. New York: McGraw-Hill Companies
- Herrena, A. 2017. "Fito Pengolahan Untuk Dekonsentrasi Warna Rhodamin B, Metilen Biru dan Metil Violet dengan Tumbuhan Air *Eichhornia crassipes* dan *Pistia stratiotes*." **Skripsi**. Surabaya: ITS.
- Hertiyani, N. 2016. "Pemanfaatan Lumpur Aktif Untuk Menurunkan Seng (Zn) Dalam Limbah Cair Pewarna Indigosol Pada Industri Batik dengan Penambahan Bakteri Indigenus". **Skripsi**. Yogyakarta: Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
- Ho, Y.B. dan Wong, W. 1994. "Growth and macronutrient removal of water hyacinth in a small secondary sewage treatment plant". **Resources, Conservation and Recycling** 11, 161-178.

- Ikwan, A. 2006. "Uji Potensi Rhizobakteri Perombak Pestisida DDT Sebagai Pupuk Hayati". **GAMMA** 2, 1:1-10.
- Jauhari, L.T. 2010. "Seleksi dan Identifikasi Kapang Endofit Penghasil Antrimikroba Penghambat Pertumbuhan Mikroba dengan Patogen". **Skripsi**. Jakarta: Universitas Islam Syarif Hidayatullah.
- Kadlec, R.H. dan Wallace, S.D. 2009. **Treatment Wetlands – Second Edition**. USA: CRC Press.
- Kurniawan, M.W., Purwanto, P., dan Sudarno, S. 2013. "Kajian Pengelolaan Air Limbah Sentra Industri Kecil dan Menengah Batik dalam Perspektif *Good Governance* di Kabupaten Sukoharjo". **Jurnal Ilmu Lingkungan** 11, 2:62-72.
- Kurniawan, S.B. 2017. "Bio-Proses Limbah Aluminium Menggunakan Isolat Bakteri dari Lingkungan Industri Daur Ulang Aluminium di Kecamatan Sumobito, Kabupaten Jombang." **Tesis**. Surabaya: ITS.
- Laksono, S. 2012. "Pengolahan Biologis Limbah Batik Dengan Media Biofilter". **Skripsi**. Depok: Universitas Indonesia.
- Lukito, A.B. 2013. "Pertumbuhan Bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dan Dekolorisasi Senyawa Pewarna *Strawberry Red* dan *Orange Yellow* dalam Kondisi Cura". **Jurnal Ilmiah Mahasiswa Universitas Surabaya** 2, 1:1-16.
- Magar, R.B., Khan, A.N. dan Honnutagi, A. 2017. "Waste Water Treatment using Water Hyacinth". **32nd Indian Engineering Congress**. The Instituion of Engineers (India).
- Mahmudah, N. 2015. Dekolorisasi Limbah Pewarna Tekstil Buatan dan Alami dengan *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis*. **Skripsi**. Surabaya: Jurusan Teknik Lingkungan, ITS.
- Malik, Q.H. 2018. "Performance of alum and assorted coagulants in turbidity removal of muddy water". **Applied Water Science** 8:40.
- Mangkoedihardjo, S. 2006. "Biodegradability Improvement of Industrial Wastewater Using Hyacinth". **Journal of Applied Sciences** 6, 6:1409-1414.
- Mangkoedihardjo, S. dan Samudro, G. 2009. **Ekotoksikologi Teknosfer**. Surabaya: Penerbit Guna Widya.
- Margaretha, Mayasari, R., Syaiful, dan Subroto. 2012. "Pengaruh Kualitas Air Baku Terhadap Dosis dan Biaya Koagulan

- Aluminium Sulfat dan Poly Aluminium Chloride". **Jurnal Teknik Kimia** Vol. 18, No. 4.
- Metcalf & Eddy. 2014. **Wastewater Engineering Treatment and Reuse**. New York: McGraw-Hill.
- Muzamil, M.A. 2010. "Dampak Limbah Cair Pabrik Tekstil PT. Kenara Terhadap Kualitas Air Sungai Winong Sebagai Irigasi Pertanian Di Desa Purwosuman Kecamatan Sidoharjo Kabupaten Sragen". **Skripsi S-1**. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Ngajow, M., Abidjulu, J., dan Kamu, V.S. 2013. Pengaruh Antibakteri Ekstrak Kulit Batang Matoa (*Pometia pinnata*) terhadap Bakteri *Staphylococcus aureus* secara *In-vitro*. **Jurnal MIPA UNSRAT Online** 2, 2:128-132.
- Norjannah, S. 2015. "Keefektifan Dosis Koagulan Ferri Klorida (FeCl_3) Dalam Menurunkan Kadar *Total Suspended Solids (TSS)* Pada Air Limbah Batik Brotoseno Masaran Sragen". **Skripsi S-1**. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Nurlina, Zahara, T.A., Gusrizal, dan Kartika, I.D. 2015. "Efektivitas Penggunaan Tawas dan Karbon Aktif Pada Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu". **Prosiding SEMIRATA 2015 Bidang MIPA BKS-PTN Barat**. Pontianak: Universitas Tanjungpura.
- Nuryana, R. 2016. "Pemanfaatan Selulosa dari Eceng Gondok sebagai Bahan Baku Pembuatan CMC (*CarboxyMethyl Cellulose*) dengan Media Reaksi Campuran Larutan Metanol – Propanol". **Skripsi**. Palembang: Politeknik Negeri Sriwijaya.
- Nzila, A., Razzak, S.A., dan Zhu, J. 2016. "Bioaugmentation: An Emerging Strategy of Industrial Wastewater Treatment for Reuse and Discharge". **International Journal of Environmental Research and Public Health** Vol. 13, No.846.
- Parmar, K.A., Prajapati, S., Patel, R., dan Dabhi, Y. 2011. "Effective Use of Ferrous Sulfate and Alum as Coagulant in Treatment of Dairy Industry Wastewater". **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences** Vol. 6, No.9.

- Pivetz, B.E. 2001. "Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites". **EPA ORD Ground Water Issue**. Washington: US-EPA.
- Polprasert, C. 2007. **Organic Waste Recycling, Technology and Management – 3rd Edition**. UK: IWA Publishing.
- Pramudita, B. dan Tangahu, B.V. 2014. "Uji Toksisitas Akut Air Limbah Industri Batik Terhadap Biota Uji Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*)". **Seminar Nasional Pascasarjana XIV**. Surabaya: ITS.
- Purwanti, I.F., Mukhlisin, M., Abdullah, S.R.S., Basri, H., Idris, M., Hamzah, A., dan Latif, M.T. 2012. "Range Finding Test of Hydrocarbon on *Scirpus mucronatus* as Preliminary Test for Phytotoxicity of Contaminated Soil". **Revelation and Science** 2, 1:59-63.
- Purwanti, I.F., Putri, T.P., dan Kurniawa, S.B. 2016. "Treatment of Chromium Contaminated Soil Using Bioremediation". **AIP Conference Proceedings**. American Institute of Physics.
- Puspita, U.R., Siregat, A.S., dan Hidayati, N.V. 2011. "Kemampuan Tumbuhan Air sebagai Agen Fitoremediator Logam Berat Kromium (Cr) yang Terdapat Pada Limbah Cair Industri Batik". **Jurnal Berkala Perikanan Terubuk** Vol. 39, No. 1.
- Rachmawati, S. 2008. "Penyisihan COD, BOD, dan TSS dalam Limbah Industri Pencelupan Benang dengan Metode Bioreaktor Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) dan Koagulasi-Flokulasi". **Skripsi S1**. Surabaya: ITS.
- Raissa, D.G. dan Tangahu, B.V. 2017. "Fitoremediasi Air yang Tercemar Limbah Laundry dengan Menggunakan Kayu ayu (*Pistia stratiotes*)". **JURNAL TEKNIK ITS** Vol. 6, No. 2.
- Reddy, K.R. 1981. "Diel variations in physio-chemical parameters of water in selected aquatic systems". **Hydrobiologia** 85, 3: 201-207
- Reynolds, T.D. dan Richards, P.A. 1996. **Unit Operations and Processes in Environmental Engineering**. Boston: PWS Publishing Company.
- Risdianto, D. 2007. "Optimasi Proses Koagulasi Flokulasi untuk Pengolahan Air Limbah Industri Jamu". **Tesis S2**. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., dan Nigam, P. 2001. "Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on

- current treatment technologies with a proposed alternative". **Bioresource Technology** 77, 3:247-255.
- Rofifah, K. 2018. "Pengolahan Air Limbah Tekstil Menggunakan Tanaman Air dan Bioaugmentasi Bakteri". **Skripsi S1**. Surabaya: ITS.
- Romayanto, M.E.W., Wiryanto, dan Sajidan. 2006. "Pengolahan limbah domestik dengan aerasi dan penambahan bakteri *Pseudomonas putida*." **Bioteknologi** 3, 2: 42-49.
- Sayuti, P.A. 2015. "Keefektifan Dosis Koagulan Ferri Chlorida (FeCl_3) Dalam Menurunkan Kadar *Chemical Oxygen Demand (COD)* Pada Limbah Cair Industri Batik CV. Brotoseno Masaran Sragen". **Skripsi S-1**. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Selcuk, H. 2005. "Decolorization and detoxification of textile wastewater bu ozonation and coagulation process". **Dyes and Pigments** 64, 217-222.
- Setiadi, T., Pertiwi, F.I., dan Widyarsa, I.I. 1999. "Pengolahan Limbah Cair Industri Tekstil yang Mengandung Zat Warna Azo Reaktif dengan Proses Gabungan Anaerob dan Aerob". **Kongres Pertama Himpunan Toksikologi Indonesia. Jakarta**, 22-23 Februari.
- Setyaningsih, H. 2007. "Pengolahan limbah batik dengan proses kimia dan adsorpsi karbon aktif". **Tesis Program Pasca Sarjana**. Depok: Universitas Indonesia.
- Shah, M.P. 2014. "Biodegradation of Azo Dyes by Three Isolated Bacterial Strains: An Environmental Bioremedial Approach". **Journal Microbial & Biochemical Technology**.
- Shah, R.A., Kumawat, D.M., Singh, N., dan Wani, K.A. 2010. "Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as a Remediation Tool For Dye-Effluent Pollution". **International Journal of Science and Nature** 1, 2:172-178.
- Sianita D. dan Nurchayati, I.S. 2009. "Kajian Pengolahan Limbah Cair Industri Batik, Kombinasi Aerob-Anaerob dan Penggunaan Koagulan Tawas". **Skripsi-S1**. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Sitanggang, P. Y. 2017. **Pengolahan Limbah Tekstil dan Batik di Indonesia**. Bandung: ITB.
- Sivakumar, V., Asaithambi, M., dan Sivakumar, P. 2012. "Physico-chemical and adsorption studies of activated carbon from

- Agricultural wastes". **Advances in Applied Science Research** 3, 1:219-226.
- Sudjarwo, T., Nisyawati, Rossiana, N., dan Mangunwardoyo, W. 2014. "The growth of water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart. Solms) and water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) in domestic wastewater in wastewater treatment plant (WWTP) Bojongsoang, Bandung, Indonesia". **Journal of Biodiversity and Environmental Sciences** 5, 4:393-401.
- Sudrajat, S.U. 2004. **Analisis dan Pengelolaan Pencemaran Lingkungan**. Samarinda: Universitas Mulawarman.
- Suelee, A.L. 2015. "Phytoremediation Potential of Vetiver Grass (*Vetiverie zozanioides*) for Water Contaminated with Selected Heavy Metal". **Project Report for the Degree of Bachelor of Environmental Science and Technology**. Selangor: Universiti Putra Malaysia.
- Suyasa, B. 2015. **Pencemaran Air dan Pengolahan Air Limbah**. Denpasar: Udayana University Press.
- Tan, K.A., Morad, N., dan Ooi, J.Q. 2016. "Phytoremediation of Methylene Blue and Methyl Orange Using *Eichhornia crassipes*". **International Journal of Environmental Science and Development** 7, 10:724-728.
- Telke, A.A., Kalyani, D.C. Dawkarm V.V., dan Govindwar, S.P. 2009. "Influence of organic and inorganic compounds on oxireductive decolorization of sulfonated azo dye C.I. Reactive Orange 16". **Journal of Hazardous Material** 172, 298-309
- Titah, H.S., Abdullah, S.R.S., Idris, M., Anuar, N., Basri, H., dan Mukhlisin, M. 2012. "Arsenic Range Finding Phytotoxicity Test Against *Ludwigia octovalvis* as First Step in Phytoremediation". **Research Journal of Environmental Technology** 6, 4:151-159.
- Todar, K. 2012. **Online Textbook of Bacteriology**. <URL:www.textbookofbacteriology.net Diakses pada tanggal: 27 Juni 2019>
- Valerie, Wijaya, J.C., dan Pinotoan, R. 2018. "Kajian Pustaka: Pemanfaatan Mikroba yang Berpotensi Sebagai Agen Bioremediasi Limbah Pewarna Tekstil". **FaST – Jurnal Sains dan Teknologi** Vol 2, No. 1.

- Vamerali, T., Bandiera, M., Coletto, C., Zanetti, F., Dickinson, N.M., dan Mosca, G. 2009. "Phytoremediation Trial on Metals and Arsenic Contaminated Pyrate Wastes". **Environmental Pollution** 157, 887-894.
- Vijayalakshmi, S.R. dan Muthukumar, K. 2015. "Improved biodegradation of textile dye effluent by coculture". **Ecotoxicology and Environmental Safety** 114, 23-30.
- Wu, W., Jin, Y., Bai, F., dan Jin, S. 2015. **Molecular Medical Microbiology (Second Edition)**. Elsevier.
- Yuliani, Umar, M.R., Tambaru, E., dan Ambeng. 2014. **Analisis Akumulasi Timbal (Pb) Pada Eceng Gondok *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms dan Perairan Dari Beberapa Lokasi di Kota Makassar**. Makassar: Universitas Hasanuddin.
- Zhao, Y.Q., Lu, J.B., Zhu, L., dan Fu, Z.H. 2006. "Effects of nutrient levels on growth characteristics and competitive ability of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), an aquatic invasive plant". **Biodiversity Science** 14, 159-164.
- Zille, A. 2005. "Laccase Reactions for Textile Applications". **Disertasi**. Italia: Universidade do Minho.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN A PROSEDUR ANALISIS LABORATORIUM

A. Prosedur Analisis COD Menggunakan Metode Titrimetri

1. Tuangkan 2,5 mL air sampel dan 2,5 mL air aquades (sebagai blanko) ke dalam masing-masing tabung COD
2. Tambahkan 0,15 mL larutan Kalium Dikromat ($K_2Cr_2O_7$) 0,25 N
3. Tambahkan 2,5 mL larutan campuran Ag_2SO_4 dan H_2SO_4
4. Panaskan pada alat pemanas digester selama 2 jam hingga suhu $148^\circ C$ dan angkat saat suhu mejadi $100^\circ C$
5. Dinginkan hingga bersuhu ruang
6. Tuangkan ke dalam Erlenmeyer 100 mL dan tambahkan 2 tetes indikator feroin
7. Titrasi sampel dan blanko dengan larutan standar FAS 0,0125 N hingga warna menjadi merah bata atau kecoklatan
8. Hitung COD sampel dengan rumus:

$$COD (mg O_2/L) = \frac{(a-b) \times N \times 8000}{volume\ sampel} \times P$$

Dimana:

- a = mL FAS titrasi blanko
- b = mL FAS titrasi sampel
- N = normalitas larutan FAS
- P = pengenceran

B. Prosedur Analisis BOD Menggunakan Metode Winkler

1. Menentukan besarnya pengenceran dari angka $KMnO_4$ dengan rumus berikut:

$$P = \frac{Angka\ KMnO_4}{3\ atau\ 5}$$

2. Tuangkan sampel sesuai pengenceran ke dalam labu takar 500 mL dan tambahkan air pengencer sampai batas labu

3. Tuangkan air sampel ke dalam botol Winkler 300 mL dan botol Winkler 150 mL sampah tumpah dan tutup dengan rapat
4. Tuangkan air pengencer ke botol Winkler 300 mL dan botol Winkler 150 mL sebagai blanko, sampai tumpah dan tutup dengan rapat
5. Masukkan botol Winkler 300 mL ke dalam inkubator 20°C selama 5 hari
6. Analisis oksigen terlarut air dalam botol Winkler 150 mL dengan prosedur sebagai berikut
 - a. Tambahkan 1 mL larutan $MnCl_2$
 - b. Tambahkan 1 mL pereaksi oksigen
 - c. Tutup botol dan pastikan tidak ada gelembung udara, lalu bolak-balikkan beberapa kali
 - d. Biarkan gumpalan mengendap selama 5-10 menit
 - e. Tambahkan 1 mL H_2SO_4 , tutup rapat dan bolak-balikkan
 - f. Tuangkan 100 mL larutan ke dalam erlenmeyer 250 mL
 - g. Titrasi dengan larutan Natrium Thiosulfat 0,0125 N sampai warna coklat muda
 - h. Tambahkan 3 tetes indikator amilum dan titrasi dengan Natrium Thiosulfat hingga warna biru hilang
7. Setelah 5 hari, analisis larutan dalam botol Winkler 300 mL dengan analisa oksigen terlarut
8. Hitung oksigen terlarut dan BOD dengan rumus:

$$OT \text{ (mg } O_2/L) = \frac{a \times N \times 8000}{\text{volume sampel}}$$

$$BOD_{5^{20}} \text{ (mg/L)} = \frac{[(X_0 - X_5) - (B_0 - B_5)]}{P}$$

$$P = \frac{\text{volume sampel yang ditambahkan}}{\text{volume hasil pengenceran (500 mL)}}$$

Dimana:

X_0 = oksigen terlarut sampel pada hari-0

X_5 = oksigen terlarut sampel pada hari-5

B_0 = oksigen terlarut blanko pada hari-0

- B5 = oksigen terlarut blanko pada hari-5
- P = derajat pengenceran
- a = volume titran (mL)
- N = Normalitas Natrium Thiosulfat

C. Prosedur Analisis TSS Menggunakan Metode Gravimetri

1. Membakar cawan porselin dalam furnace dengan suhu 550°C selama 1 jam, kemudian masukkan ke dalam oven 105°C selama 15 menit
2. Masukkan kertas saring ke oven 105°C selama 1 jam
3. Dinginkan cawan dan kertas saring dalam desikator selama 15 menit
4. Timbang cawan dan kertas saring dengan neraca analitik (A g)
5. Letakkan kertas saring yang telah ditimbang pada vakum filter
6. Menuangkan 25 mL sampel air di atas filter yang telah dipasang pada vakum filter, catat volume sampel yang digunakan (C mL)
7. Saring sampel sampai kering dan tidak ada air tersisa
8. Letakkan kertas saring pada cawan porselin dan masukkan ke dalam oven 105°C selama 1 jam
9. Dinginkan cawan dan kertas saring dalam desikator selama 15 menit
10. Timbang cawan dan kertas saring beserta filtrat pada neraca analitik (B g)
11. Hitung jumlah zat pada tersuspensi (TSS) dengan rumus berikut:

$$\text{TSS (mg/L)} = \frac{(B-A)}{c} \times 1000 \text{ mg/g} \times 1000 \text{ mL/L}$$

D. Prosedur Analisis Konsentrasi Warna dengan Spektrofotometer

Mencari panjang gelombang maksimum

Prosedur mencari panjang gelombang maksimum adalah sebagai berikut

1. Membuat larutan sebesar 1 ppm (1 mg/L atau 10 mg/L) – konsentrasi terendah
2. Melakukan pembacaan konsentrasi tersebut pada spektrofotometer dalam range panjang gelombang sesuai dengan tipe warna pada sampel
3. Ukur larutan di spektrofotometer dengan interval panjang gelombang 50 nm (misal range 300 nm – 700 nm; maka 300 nm, 350 nm, 400 nm, 450 nm, dst.)
4. Cari panjang gelombang hingga mendapatkan titik puncak
5. Dibuat dalam grafik, nilai absorbansi tepat sebelum nilai absorbansi turun (nilai absorbansi puncak) menunjukkan panjang gelombang maksimal.

Contoh: 300 nm = 0,05
 350 nm = 0,2
 400 nm = 0,3
 450 nm = 0,35
 500 nm = 0,32

Didapatkan 450 nm sebagai titik puncak

6. Panjang gelombang antara range 450 nm – 500 nm, dapat dicari lagi dengan interval lebih kecil, hingga mendapatkan nilai paling tinggi
7. Interval 460, 470, 480, dst. Nilai puncak ada tepat sebelum turun = panjang gelombang yang digunakan.

LAMPIRAN B DATA HASIL ANALISIS

1. Uji Jar Test Aluminium Sulfat dengan 100 rpm

Tabel LB. 1 Nilai Akhir COD, TSS, dan Warna pada Jar Test dengan 100 rpm

Dosis Alum (mg/L)	Parameter		
	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	Warna (A)
100	2460	524	0,337
200	1700	128	0,065
300	1240	156	0,027
400	1000	108	0,038
500	840	160	0,08
600	590	28	0,049
700	710	8	0,033
800	620	8	0,059
900	510	12	0,074
1000	820	16	0,091
1100	620	260	0,191
1200	830	36	0,185
1300	1020	28	0,159
1400	1230	12	0,18
1500	1140	12	0,144
1600	1030	232	0,058
1700	920	160	0,05
1800	810	144	0,047
1900	1000	164	0,05
2000	940	72	0,044

Tabel LB. 2 Efisiensi Penyisihan COD, TSS, dan Warna pada Jar Test dengan 100 rpm

Dosis Alum (mg/L)	Removal		
	COD	TSS	Warna
100	71,6%	80,7%	83,0%
200	80,4%	95,3%	96,7%
300	85,7%	94,3%	98,6%
400	88,5%	96,0%	98,1%
500	90,3%	94,1%	96,0%
600	93,2%	99,0%	97,5%
700	91,8%	99,7%	98,3%
800	92,8%	99,7%	97,0%
900	94,1%	99,6%	96,3%
1000	90,5%	99,4%	95,4%
1100	92,8%	90,4%	90,3%
1200	90,4%	98,7%	90,6%
1300	88,2%	99,0%	92,0%
1400	85,8%	99,6%	90,9%
1500	86,8%	99,6%	92,7%
1600	88,1%	91,5%	97,1%
1700	89,4%	94,1%	97,5%
1800	90,6%	94,7%	97,6%
1900	88,5%	94,0%	97,5%
2000	89,1%	97,4%	97,8%

Tabel LB. 3 Perubahan pH pada Jar Test dengan 100 rpm

Dosis Alum (mg/L)	pH setelah penambahan alum	pH setelah proses koagulasi-flokulasi
100	7,01	7,6
200	6,38	7,08
300	5,84	6,3
400	4,81	4,79
500	4,5	4,44
600	4,55	4,37
700	4,17	4,32
800	4,18	4,3
900	4,41	4,26
1000	4,31	4,2
1100	3,95	4,22
1200	3,96	4,2
1300	4,04	4,18
1400	4,09	4,16
1500	3,97	4,17
1600	4,1	4,12
1700	3,95	4,1
1800	4	4,12
1900	3,97	4,11
2000	4,04	4,09

2. Analisis Pengolahan Air Limbah Batik oleh Bioreaktor

Tabel LB. 4 Konsentrasi dan Penyisihan COD

COD (mg/L)					Penyisihan		
Hari ke-	RK	R5	R10	Baku Mutu	RK	R5	R10
0	510	510	510	150	0,0%	0,0%	0,0%
1	450	670	820	150	11,8%	-31,4%	-60,8%
3	330	700	930	150	35,3%	-37,3%	-82,4%
5	390	730	940	150	23,5%	-43,1%	-84,3%
7	280	460	580	150	45,1%	9,8%	-13,7%

Tabel LB. 5 Rasio BOD/COD

Reaktor	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	Rasio BOD/COD
Awal	69,7	510	0,14
RK	32	280	0,12
R5	50	460	0,11
R10	37	580	0,06

Tabel LB. 6 Konsentrasi dan Penyisihan TSS

TSS (mg/L)					Penyisihan		
Hari ke-	RK	R5	R10	Baku Mutu	RK	R5	R10
0	20	20	20	50	0%	0%	0%
1	16	8	52	50	20%	60%	-160%
3	4	32	32	50	80%	-60%	-60%
5	12	16	40	50	40%	20%	-100%
7	12	16	32	50	40%	20%	-60%

Tabel LB. 7 Absorbansi dan Penyisihan Warna

Hari ke-	Warna (A)			Penyisihan		
	RK	R5	R10	RK	R5	R10
0	0,135	0,135	0,135	0%	0%	0%
1	0,065	0,117	0,182	52%	13%	-35%
3	0,03	0,097	0,171	78%	28%	-27%
5	0,023	0,059	0,106	83%	56%	21%
7	0,025	0,052	0,124	81%	61%	8%

Tabel LB. 8 Parameter Suhu dan pH Bioreaktor

Hari ke-	pH			Suhu		
	RK	R5	R10	RK	R5	R10
0	5,8	5,8	5,8	28	28	28
1	7,9	7,76	7,76	30	29	30
2	8,3	8,04	7,95	30	30	30
3	8,33	8,12	8,13	30,5	30,5	31
4	8,33	8,23	8,26	30,5	31	31
5	8,43	8,31	8,4	31	31	32
6	8,46	8,34	8,41	30,5	31	31
7	8,45	8,4	8,47	30	31	31

Tabel LB. 9 Berat Basah dan Berat Kering Tumbuhan

Berat Basah (g)			Berat Kering		
Reaktor	Awal (H0)	Akhir (H7)	Reaktor	Awal (H0)	Akhir (H7)
RK	30	45	RK	2,7	2,87
R5	39	47	R5	3,4	3,19
R10	40	50	R10	3,8	4,14

Tabel LB. 10 Morfologi Tumbuhan

Morfologi Tumbuhan								
Lebar Daun								
Hari	0	1	2	3	4	5	6	7
RK	10,3	10,25	10,25	10,25	10,2	9,95	9,2	8,7
R5	10,55	10,4	10,45	10,45	10,55	10,55	10,55	10,5
R10	9,4	9,2	9,25	9,25	9,4	9,3	8,1	6,85
Panjang Tumbuhan								
Hari	0	1	2	3	4	5	6	7
RK	12	12	12	12	12,5	12,5	12,5	12,5
R5	10	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
R10	11,75	11,75	12,25	12,25	12,75	12,75	12,75	12,75
Panjang Akar								
Hari	0	1	2	3	4	5	6	7
RK	9,85	10,9	10,9	11	11	11,25	11,25	11,25
R5	10,25	10,25	10,35	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
R10	11	12	12	12	12	12,25	12,5	12,5

Tabel LB. 11 Data CFU pada Bioreaktor

Hari ke-	Reaktor	Hasil Jumlah Koloni	Angka Pengenceran	Volume sampel (mL)	Jumlah koloni/mL	Nilai log CFU
0	R5	243	0,000001	60	4050000	6,607455
	R10	112	0,0000001	60	18666666,67	7,271067
	RK	0	0,000001	60	0	-
1	R5	1220	0,00000001	60	20333333,33	9,308209
	R10	53	0,00000001	60	8833333,33	7,946125
	RK	0	0,000001	60	0	-
3	R5	1284	0,00000001	60	2140000000	9,330414
	R10	52	0,00000001	60	86666666,67	7,937852
	RK	0	0,000001	60	0	-1
5	R5	48	0,0000001	60	8000000	6,90309
	R10	624	0,00000001	60	1040000000	9,017033
	RK	0	0,000001	60	0	-
7	R5	2	0,0000001	60	333333,3333	5,522879
	R10	37	0,000000001	60	616666666,7	8,79005
	RK	0	0,000001	60	0	-

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN C PERHITUNGAN DESAIN REAKTOR KOAGULASI- FLOKULASI

Kriteria Desain

Proses	Kriteria	Nilai	Sumber
Koagulasi	G	500 – 1500 det ⁻¹	Metcalf & Eddy (2014)
Flokulasi	G	50 – 100 det ⁻¹	Metcalf & Eddy (2014)
	GT	10 000 – 100 000	Reynolds & Richards (1996)

Ditentukan

Volume air = 60 L = 0,06 m³

Suhu = 28 °C

μ = 0,8363 x 10⁻³ Ns/m²

ρ = 996,3 kg/m³

G (koagulasi) = 500 s⁻¹

Kecepatan pengadukan:

koagulasi = 100 rpm = 1,667 rps

flokulasi = 30 rpm = 0,5 rps

Jenis pengaduk:

Flat paddle 2 blades (D/W = 6; K_L = 36,5; K_T = 1,70)

Perhitungan

Power untuk proses koagulasi

$$\begin{aligned}
 P &= G^2 \times \mu \times \text{vol} \\
 &= (500 \text{ s}^{-1})^2 \times (0,8363 \times 10^{-3} \text{ Ns/m}^2) \times (0,06 \text{ m}^3) \\
 &= 12,54 \text{ Nm/s} = 12,54 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

Diameter paddle yang digunakan

$$\begin{aligned}
 D &= \left(\frac{P}{K_T \times n^3 \times \rho} \right) \\
 &= \left(\frac{12,54 \text{ Nm/s}}{1,7 \times (1,667 \text{ rps})^3 \times (996,3 \text{ kg/m}^3)} \right) \\
 &= 0,28 \text{ m} \\
 &= 28 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

D/W = 6, maka W paddle = 4,6 cm

Power untuk proses flokulasi

$$\begin{aligned} P &= K_T \times n^3 \times D^5 \times \rho \\ &= 1,7 \times (0,5 \text{ rps})^3 \times (0,28 \text{ m})^5 \times 996,3 \text{ kg/m}^3 \\ &= 0,34 \text{ Nm/s} = 0,34 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Cek nilai G dan GT untuk flokulasi

$$\begin{aligned} G &= \sqrt{\frac{P}{\mu v}} \\ &= \sqrt{\frac{0,34 \frac{\text{Nm}}{\text{s}}}{\left(0,8363 \times 10^{-3} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}\right) (0,06 \text{ m}^3)}} \\ &= 82,2 \text{ detik}^{-1} \quad (\text{memenuhi kriteria}) \\ GT &= 82,2 \times 20 \text{ menit} \times 60 \text{ detik/menit} \\ &= 98590 \quad (\text{memenuhi kriteria}) \end{aligned}$$

BIOGRAFI PENULIS



Kita Pritasari Arumdati dilahirkan di Jakarta pada tanggal 9 September 1997. Penulis merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di TK Kinderfield, SD Sekolah Bina Gita Gemilang, SMP Pakistan International Embassy School, dan SMA Sinergia Worldwide Education, yang seluruhnya berlokasi di Jakarta. Pada tahun 2015, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perkuliahan di Departemen Teknik Lingkungan FTSLK ITS. Pada tahun 2017, penulis menjadi asisten laboratorium praktikum Kimia Lingkungan II dan pada tahun 2019 menjadi asisten laboratorium praktikum Teknik Analisis Pencemar Lingkungan. Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam kegiatan organisasi mahasiswa, yaitu Ikatan Mahasiswa Teknik Lingkungan Indonesia (IMTLI) pada tahun 2016-2017 dan *Environmental Engineering English Club* (EEEC) di Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) ITS pada tahun 2016-2018. Penulis juga kerap mengikuti lomba *Model United Nations* dalam tahap nasional maupun internasional. Pada tahun 2018, penulis melaksanakan Kerja Praktik di PT. Pertamina Gas EJA, Surabaya pada bagian *Health, Safety and Environment*. Penulis dapat dihubungi melalui email kita.pritasari15@gmail.com.



KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : Kita Pritasari Anumdati
NRP : 0321154000092
Judul : Pengolahan Air Limbah Batik Menggunakan Koagulasi Kimia dan Bioaugmentasi Ecarsiper dengan Paeruginata.

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1	26/1	Revisi Proposal: ◦ diskusi saran dosen pengarah ◦ ganti Tujuan (2 tujuan cukup)	
2	1/2	◦ kerapatan tanaman pea ◦ tambah parameter TSS ◦ karbon aktif selalu baru, tidak perlu titik jenuh ◦ berat basah - berat kering tumbuhan 1x/minggu ◦ kontrol bakteri	
3	11/2	Pembibitan bakteri, analisis warna, pengambilan sampel air limbah	
4	18/2	ganti karbon aktif → koagulasi kimia (dengan alum) ◦ tentukan dosis dan rpm (variabel)	
5	13/3	reaktor koagulasi, hasil running fitoremediasi	
6	24/3	Data jorkest dan running fitoremediasi ◦ hasil duplo (pilih yang terbaik) ◦ jelaskan pengulangan jorkest	
7	17/6	Bibitan bakteri hasil reaktor koagulasi-flokulasi	
8	25/6	Hasil RFT → tambah teori fitotoksisitas. pH meningkat → tumbuhan lebih berpengaruh	

Surabaya, 27 Juni 2018
Dosen Pembimbing



KTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2018/2019

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
No. Revisi: 01

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

Nilai TOEFL : 613

Hari, tanggal : Rabu, 8 Mei 2019
Pukul : 08.00 - 09.00
Lokasi : TL 102
Judul : Pengolahan Air Limbah Industri Batik Menggunakan Koagulasi Kimia dan Bioaugmentasi *Eichhornia crassipes* dengan *Pseudomonas aeruginosa*
Nama : Kita Pritasari Arumdati
NRP. : 0321154000092
Topik : Penelitian

Tanda Tangan

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Seminar Kemajuan Tugas Akhir
①	Prof. Yulinda Kunva hore jarkes janga dimbungka → buat kurva bar kon beda reaktor Knp hore dicampur? Hal 60 → ditilangka Hg hujra jarkes -- Knp ada huj 2 → mohon syarik Hg hujra da Prof. Sarwoto.
②	Prof. Sarwoto Tipe no. 1 → koreksi ke dimbah. Sara dari Prof. Sarwoto. RFT Krague - fletusi → biostimulasi
③	Bioby boyant RFT → dpa USAEPA → ftague - fletusi PH lebih diperhentikan.

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

Dosen Pembimbing

Harmin Sulistiyaning Titah, S.T. M.T., Ph.D.



FORMULIR PERBAIKAN LAPORAN TUGAS AKHIR

Nama : Kita Pritasari Arumdati
NRP : 0321154000092
Judul Tugas Akhir : Pengolahan Air Limbah Industri Batik Menggunakan
Koagulasi Kimia dan Eceng Gondok dengan Bioaugmentasi
Menggunakan *Pseudomonas aeruginosa*

No	Saran Perbaikan (sesuai Form UTA-02)	Tanggapan / Perbaikan (bila perlu, sebutkan halaman)
1	Profil warna	tanpa kurva kalibrasi, menggunakan nilai Absorbansi dan % Dekolonisasi
2	Tambahkan diagram proses dan mass balance	sudah ditambahkan
3	Reaksi penambahan kapur? Apa yang terjadi? Dijelaskan	sudah ditambahkan di laporan
4	Perbaikan saran yang sesuai dengan temuan dalam penelitian	sudah diperbaiki
5	Pengaruh <i>P. aeruginosa</i> terhadap eceng gondok bagaimana?	sudah ditambahkan di laporan
6	(Hal 57) beri legenda (Hal 96) perbaiki judul kurva.	sudah diperbaiki

Dosen Pembimbing,

Harmin Julistiyuning Tiyah, ST, M.T., Ph.D.

Mahasiswa Ybs.,

Kita Pritasari Arumdati



UTA-S1-TL-02 TUGAS AKHIR
 Periode: Genap 2018-2019

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
 No. Revisi: 01

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

Hari, tanggal : Senin, 15 Juli 2019

Nilai TOEFL 613

Pukul : 07.30 - 09.30

Lokasi : TL 105

Judul : Pengolahan Air Limbah Industri Batik Oleh Koagulasi Kimia dan Eceng Gondok dengan Bioaugmentasi Menggunakan *Pseudomonas aeruginosa*

Nama : Kita Pritasari Arumdati

NRP. : 03211540000092

Topik : Penelitian

Tanda Tangan

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir
①	<p>Prof. Julinah</p> <ul style="list-style-type: none"> → efek hieris tumbuhan dan bakteri. → penelitian → fito pengolahan → pengolahan dg tumbuhan. → tumbuhan menyerap ion-ion. → knp sect RFT → ada daun yg kuning? sel pecah. C/N ratio hal 65
②	<p>Bu Ellia</p> <ul style="list-style-type: none"> → Abstrak → Pernyataan blm ada referensinya. → Penambahan nutrisi hanya di awal. → sekurang-kurangnya nutrisi → Pembakuan nilai NPK. → F/M ahanya. → hari setelah proses biogas/floka dan KF + biologi → nilai BOD/COD → 0,14 → adanya loga berat. Pembakuan pseudomon → dg loga berat. → penanase kapur → 30 gr. → kondisi operasi → ada efektivitas pengendalian oleh kapur. <p style="text-align: right;">23/7/2019</p>

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

Harmin Sulistiyoning Titah, S.T., M.T., Ph.D.

Pak Anom

→ diagram alir → proses.

→ akreditasi.

→ standar de sampel aseli → force student.



UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
 Periode: Genap 2018-2019

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
 No. Revisi : 01

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

Hari, tanggal : Senin, 15 Juli 2019
 Pukul : 07.30 - 09.30
 Lokasi : TL 105
 Judul : Pengolahan Air Limbah Industri Batik Oleh Koagulasi Kimia dan Eceng Gondok dengan Bioaugmentasi Menggunakan *Pseudomonas aeruginosa*
 Nama : Kita Pritasari Arumdati
 NRP. : 0321154000092
 Topik : Penelitian

hal 57 → beri legend utk
 bahan mutasi pd gbr.

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
hal 3	Bahan sumber masalah : Pengaruh <i>P. aeruginosa</i> thd. e. gondok bagaimana ?
65	hal 65 → tabel jenis parameter uji!
86	jenis jenis tumbuhan yg. lebih sensitif !
76	Bentuk kuvan : bentuk "Berkubah". saat
1.	Jelaskan mekanisme removal COD oleh ^{akum} tumbuhan / fitotek.
2.	" ^{bagaimana} removal proses dapat ditunjukkan utk ^{menyaji} bahan mutasi.
3.	Jelaskan kuvan pertumbuhan bakteri. Bagaimana cara mengontrolnya agar bakteri tetap pd. jarak logaritma? ^{bagaimana}
4.	Pengaruh kadar karbon kuning pd. e. gondok pada uji RFT? ^{apn yg. terjadi? Reklamasi?} ^{yg. harus lebih dalam menyaji sebelum penelitian?}

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

Dosen Penguji : Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, MAppSc

Dosen Pembimbing : Harmin Sulistiyaning Titah, S.T., M.T., Ph.D.

(*[Signature]*)
 (*[Signature]*)



UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
 Periode: Genap 2018-2019

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
 No. Revisi: 01

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

Hari, tanggal : Senin, 15 Juli 2019
 Pukul : 07.30 - 09.30
 Lokasi : TL 105
 Judul : Pengolahan Air Limbah Industri Batik Oleh Koagulasi Kimia dan Eceng Gondok dengan Bioaugmentasi Menggunakan *Pseudomonas aeruginosa*
 Nama : Kita Pritasari Arumdati
 NRP. : 0321154000092
 Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
-	Jelaskan definisi koagulasi, flokulasi dan sedimentasi
-	Mekanismenya proses koagulasi? flokulasi, sedimentasi?
-	Faktor ² yg mempengaruhi.
-	Mengapa ditambahkan belerang?
-	Rasio 69,7/510 = tetap ± 0.1? → dgn pengaliran dilampiran
-	dg proses biologis?
-	pH 6,6 - 7 → tambah kapur? → reaksi yg terjadi dgn? Lumpur
-	Perlu nutrisi lain?
-	Jelaskan faktor penting dlm pengolahan air limbah secara biologis?
-	Mekanismenya penyerapan nutrisi utk pertumbuhan tanaman? Biotransformasi harus dipecah dulu jadi ion !!!
-	Faktor yg mempengaruhi efektifitas penurun COD tabel 22.

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.
 Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
 Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji
 Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing
 - Saran harus yg membuat temuan dan penelitian. Hk 6/18
 Ujig².

Dosen Penguji : Dr. Ir. Ellina Pandebesie, M.T.

Dosen Pembimbing : Harmin Sulistiyoning Titah, S.T., M.T., Ph.D.

[Handwritten signature]

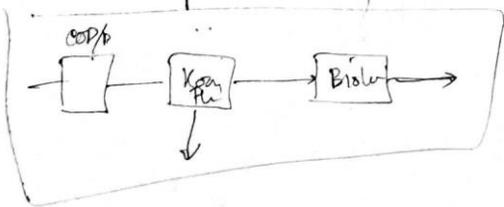


UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2018-2019

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
No. Revisi: 01

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

Hari, tanggal : Senin, 15 Juli 2019
Pukul : 07.30 - 09.30
Lokasi : TL-102
Judul : Pengolahan Air Limbah Industri Batik oleh Koagulasi Kimia dan Eceng Gondok dengan Bioaugmentasi Menggunakan *Pseudomonas aeruginosa*
Nama : Kita Pritasari Arumdati
NRP. : 03211540000092
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
①	Aklimatisasi \Rightarrow EG lebat / salit ?
②	Profil warna \rightarrow apa linier dg A (530-nm)
③	Dosis alum & opm \rightarrow apa sesuai dg kadar koagulasi \rightarrow flokulasi
④	Ditambahkan juga pros e mass balance dan penelitian sdr.  <p>24/2019 Ass. 7 Hadis-jomard</p>

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

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

Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji

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

Dosen Penguji Abdu Fadli Assomadi, S.T., M.T., Ph.D.

Dosen Pembimbing Harmin Sulistiyaning Titah, S.T., M.T., Ph.D.

