

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

RANCANG BANGUN SISTEM EKOTEKNOLOGI BERBASIS INTEGRASI *BEAD* BENTONIT DAN *Canna indica* UNTUK PENGOLAHAN AIR LIMBAH TEKSTIL

FIFIA ZULTI



**PROGRAM STUDI
ILMU PENGELOLAAN SUMBERDAYA ALAM DAN LINGKUNGAN
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul Rancang Bangun Sistem Ekoteknologi Berbasis Integrasi *Bead Bentonit* dan *Canna indica* untuk Pengolahan Air Limbah Tekstil adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Juli 2026

Fifia Zulti
P0602231010

RINGKASAN

FIFIA ZULTI. Rancang Bangun Sistem Ekoteknologi Berbasis Integrasi *Bead* Bentonit dan *Canna indica* untuk Pengolahan Air Limbah Tekstil. Dibimbing oleh DYAH ISWANTINI PRADONO, ANAS MIFTAH FAUZI, dan DEWI SONDARI.

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh meningkatnya beban pencemaran air akibat aktivitas industri tekstil, khususnya air limbah tekstil yang mengandung zat warna, senyawa organik persisten, logam berat, serta nilai *chemical oxygen demand* yang tinggi. Keberadaan polutan tersebut menyebabkan penurunan kualitas air, menghambat proses fotosintesis akibat tingginya kekeruhan dan intensitas warna, serta menurunkan kadar oksigen terlarut yang pada akhirnya mengancam kelangsungan hidup biota akuatik. Di Indonesia, permasalahan pencemaran air akibat industri tekstil masih menjadi tantangan karena tingginya beban limbah yang dihasilkan serta masih ditemukannya ketidakpatuhan terhadap pengelolaan dan pembuangan air limbah sesuai dengan baku mutu. Kondisi tersebut mendorong perlunya pengembangan teknologi pengolahan yang tidak hanya efektif dalam menurunkan beban pencemar, tetapi juga adaptif untuk diterapkan secara langsung pada badan perairan yang tercemar maupun sebagai bagian dari sistem remediasi lingkungan yang berkelanjutan.

Perkembangan pengolahan air limbah tekstil mengarah pada penerapan solusi berbasis alam yang memanfaatkan proses alami untuk meningkatkan kualitas air secara berkelanjutan dengan kebutuhan energi dan biaya operasional yang lebih rendah. Sistem lahan basah terapung merupakan salah satu pendekatan ekoteknologi yang memanfaatkan sinergi tanaman, mikroorganisme, dan media perakaran untuk mereduksi polutan. Sistem tersebut masih memiliki keterbatasan dalam menghilangkan senyawa organik persisten dan zat warna apabila digunakan secara terpisah. Kondisi tersebut mendorong pengembangan sistem ekoteknologi terpadu yang mengintegrasikan media adsorben aktif dengan proses fitoremediasi untuk meningkatkan efisiensi penyisihan polutan secara berkelanjutan.

Metode adsorpsi menggunakan material alami seperti bentonit menunjukkan potensi yang menjanjikan untuk mereduksi zat warna dan senyawa organik. Bentonit memiliki luas permukaan yang besar dan kapasitas pertukaran kation yang tinggi, sehingga efektif menyerap polutan tertentu. Penggunaan bentonit dalam bentuk serbuk menghadapi kendala berupa dispersi yang tinggi dan kesulitan pemisahan setelah proses adsorpsi. Transformasi bentonit menjadi bentuk manik-manik (*bead*) meningkatkan stabilitas mekanik dan kemudahan pemulihan material. Integrasi adsorpsi dengan sistem berbasis tanaman belum banyak dikaji secara komprehensif.

Penelitian ini mengembangkan Sistem Ekoteknologi Terpadu berbasis komposit bentonit-TiO₂ dalam bentuk bead yang diintegrasikan dengan tanaman *Canna indica*. Sistem ini memadukan komponen rekayasa dan proses ekologis melalui sinergi adsorpsi pada *bead*, penyerapan polutan oleh tanaman, serta aktivitas mikroorganisme di zona perakaran yang berperan dalam biodegradasi dan transformasi senyawa pencemar. Integrasi tersebut mencerminkan prinsip ekoteknologi, yaitu pemanfaatan teknologi untuk mengoptimalkan mekanisme alami dalam meningkatkan kualitas air limbah. Penelitian ini juga mengkaji mekanisme adsorpsi melalui analisis kinetika dan isoterm untuk memahami



interaksi antara adsorben dan polutan. Pengujian sistem dilakukan secara bertahap mulai dari skala laboratorium hingga skala mesokosm, kemudian dilanjutkan dengan analisis kelayakan teknis dan ekonomi sebagai dasar perancangan Sistem Ekoteknologi Terpadu pada skala industri.

Tahap awal penelitian ini mengevaluasi kinerja bentonit alami sebagai adsorben tunggal dan dalam sistem terintegrasi. Pengujian *batch* dilakukan terhadap zat warna *methylene blue* dan *Congo red* serta parameter *Chemical Oxygen Demand*. Hasil menunjukkan bahwa bentonit mampu mereduksi warna dan *Chemical Oxygen Demand* secara signifikan dalam kondisi laboratorium. Kinerja bentonit menurun pada limbah kompleks akibat kompetisi multipolutan dan kejenuhan adsorben. Integrasi dengan tanaman meningkatkan kestabilan dan konsistensi dalam mengurangi polutan.

Pengembangan komposit bentonit-TiO₂ dalam bentuk *bead* bertujuan meningkatkan stabilitas dan efektivitas adsorpsi. Karakterisasi material menunjukkan perubahan morfologi, struktur, gugus fungsi, dan luas permukaan yang meningkatkan ketersediaan situs aktif untuk proses adsorpsi. Analisis kinetika menunjukkan bahwa model *pseudo-first-order* memberikan kesesuaian terbaik dengan data eksperimen, yang mengindikasikan bahwa laju adsorpsi didominasi oleh proses adsorpsi pada permukaan adsorben melalui interaksi fisik. Analisis isoterm menunjukkan kesesuaian dengan model Freundlich, yang mengindikasikan bahwa adsorpsi berlangsung pada permukaan yang heterogen dengan energi adsorpsi yang bervariasi serta memungkinkan terbentuknya adsorpsi multilapis. Hasil tersebut menegaskan bahwa mekanisme adsorpsi pada komposit *bead* bentonit-TiO₂ terutama melibatkan interaksi elektrostatik, gaya van der Waals, dan pertukaran ion pada permukaan adsorben.

Pengujian skala mesokosm dilakukan menggunakan reaktor berkapasitas 95 liter dengan empat perlakuan berbeda. Sistem yang mengintegrasikan *bead* komposit bentonit-TiO₂ dan tanaman *Canna indica* dalam satu unit lahan basah terapung menunjukkan kinerja terbaik. Sistem tersebut mampu menurunkan kebutuhan oksigen kimia lebih dari 80%, menurunkan padatan tersuspensi total lebih dari 95%, dan menurunkan intensitas warna lebih dari 70% dengan kestabilan operasional selama periode pengujian. Nilai pH, suhu, dan konsentrasi oksigen terlarut tetap berada dalam kisaran yang mendukung berlangsungnya proses biologis.

Integrasi *bead* dan *Canna indica* menghasilkan mekanisme sinergis dalam sistem pengolahan. *Bead* berperan sebagai media adsorpsi awal yang dapat menurunkan beban organik secara cepat. Zona rizosfer tanaman mendukung proses biodegradasi lanjutan dan penyerapan nutrisi. Sistem ini menunjukkan kestabilan pada kondisi lingkungan tropis tanpa memerlukan energi tinggi. Kualitas efluen memenuhi baku mutu air limbah industri tekstil dan sebagian parameter memenuhi kriteria mutu air kelas I menurut PP No.22 Tahun 2021.

Penelitian ini mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomi sistem integrasi *bead* bentonit-TiO₂ dan *Canna indica* melalui simulasi rancangan berkapasitas 10 m³/hari sebagai tahap *scale-up* konseptual dari hasil uji mesokosm berkapasitas 95 L menuju implementasi di lapangan. Analisis dilakukan dengan membandingkan kebutuhan investasi, biaya operasional, dan konsumsi energi pada beberapa alternatif rancangan. Hasil analisis menunjukkan bahwa biaya operasional didominasi oleh penggunaan adsorben, sedangkan kebutuhan energi relatif rendah.

Rancangan modular yang diusulkan berpotensi diterapkan secara bertahap sesuai kapasitas pengolahan serta mendukung penggunaan kembali air untuk keperluan nonkonsumsi.

Integrasi *bead* komposit bentonit-TiO₂ dan *Canna indica* menghasilkan sinergi antara proses adsorpsi, fitoremediasi, dan aktivitas mikroorganisme di zona perakaran sehingga mampu meningkatkan efisiensi dan kestabilan pengolahan air limbah tekstil. Sinergi tersebut mencerminkan prinsip ekoteknologi, yaitu pemanfaatan rekayasa material dan sistem untuk mengoptimalkan mekanisme ekologis guna meningkatkan kualitas air secara berkelanjutan. Tingkat kesiapan penerapan teknologi berada pada tingkat 5 karena konsep, rancangan, dan kinerja sistem telah divalidasi dalam lingkungan yang relevan melalui pengujian skala mesokosm serta didukung oleh analisis kelayakan teknis dan ekonomi. Konsep modular yang dikembangkan memberikan dasar bagi pengembangan sistem dengan kapasitas yang lebih besar maupun penerapannya secara terdesentralisasi, termasuk pada titik *non point source*, anak sungai, atau badan air dengan debit rendah dan beban pencemar yang terkontrol.

Kata kunci: Adsorpsi, bentonit-TiO₂, ekoteknologi terpadu, fitoremediasi, pengolahan limbah tekstil.

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



SUMMARY

FIFIA ZULTI. Design of an Ecotechnology System Based on the Integration of Bentonite Beads and *Canna indica* for Textile Wastewater Treatment. Directed by DYAH ISWANTINI PRADONO, ANAS MIFTAH FAUZI, and DEWI SONDARI.

This research is motivated by the increasing burden of water pollution due to textile industry activities, especially textile wastewater containing dyes, persistent organic compounds, heavy metals, and high chemical oxygen demand values. The presence of these pollutants causes a decrease in water quality, inhibits the photosynthesis process due to high turbidity and color intensity, and decreases dissolved oxygen levels which ultimately threaten the survival of aquatic biota. In Indonesia, the problem of water pollution due to the textile industry is still a challenge due to the high load of waste produced and non-compliance with wastewater management and disposal according to quality standards. These conditions encourage the need to develop treatment technologies that are not only effective in reducing pollutant loads, but also adaptive to be applied directly to polluted bodies of water as well as as part of a sustainable environmental remediation system.

The development of textile wastewater treatment has led to the application of nature-based solutions that utilize natural processes to improve water quality in a sustainable manner with lower energy requirements and operational costs. The floating wetland system is one of the ecotechnology approaches that utilizes the synergy of plants, microorganisms, and root media in reducing pollutants. The system still has limitations in removing persistent organic compounds and dyes when used alone. This condition encourages the development of an integrated ecotechnology system that integrates active adsorbent media with phytoremediation processes to improve the efficiency of pollutant removal in a sustainable manner.

Adsorption methods using natural materials such as bentonite show promising potential to reduce dyes and organic compounds. Bentonite has a large surface area and a high cation exchange capacity, so it effectively absorbs certain pollutants. The use of bentonite in powder form faces obstacles such as high dispersion and separation difficulties after the adsorption process. The transformation of bentonite into a bead shape improves mechanical stability and ease of material recovery. The integration of adsorption with plant-based systems has not been comprehensively studied.

This research developed an Integrated Ecotechnology System based on a bentonite-TiO₂ composite in bead form, integrated with *Canna indica*. This system combines engineering components and ecological processes through adsorption synergy in the beads, absorption of pollutants by plants, and the activity of microorganisms in the root zone that play a role in the biodegradation and transformation of polluting compounds. The integration reflects the principle of ecotechnology, which is the use of technology to optimize natural mechanisms to improve wastewater quality. This study also examines the mechanism of adsorption through kinetic and isothermal analyses to understand the interaction between adsorbents and pollutants. System testing is carried out in stages, progressing from the laboratory scale to the mesocosm scale, followed by technical and economic

feasibility analyses to inform the design of an integrated ecotechnology system at an industrial scale.

The initial stage of this study evaluated the performance of natural bentonites as a single adsorbent and in an integrated system. Batch testing was carried out on methylene blue and congo red dyes as well as chemical oxygen demand parameters. The results showed that bentonite significantly reduced color and chemical oxygen demand under laboratory conditions. The performance of bentonite decreases in complex wastewater due to multipollutant competition and adsorbent saturation. Integration with plants improves stability and consistency in reducing pollutants.

The development of bentonite–TiO₂ composites in bead form aims to improve the stability and effectiveness of adsorption. Material characterization shows changes in morphology, structure, functional group, and surface area that increase the availability of active sites for the adsorption process. Kinetic analysis showed that the pseudo-first-order model provided the best fit for the experimental data, indicating that the adsorption rate was dominated by the adsorption process on the adsorbent surface through physical interaction. The isothermal analysis is consistent with the Freundlich model, indicating that adsorption occurs on heterogeneous surfaces with varying adsorption energies and enabling multilayer adsorption. The results confirm that the adsorption mechanism in bentonite–TiO₂ bead composites primarily involves electrostatic interactions, van der Waals forces, and ion exchange at the adsorbent surface.

The mesocosm scale test was carried out using a 95-liter reactor with four different treatments. A system that integrates bentonite–TiO₂ composite beads and *Canna indica* in a single floating wetland unit shows the best performance. The system was able to reduce the requirement of chemical oxygen by more than 80%, reduce the total suspended solids by more than 95%, and reduce the color intensity by more than 70% with operational stability during the test period. The pH, temperature, and concentration values of dissolved oxygen remain within the range that supports the continuation of biological processes.

The integration of bead and *Canna indica* results in a synergistic mechanism in the processing system. Beads act as an initial adsorption medium that can rapidly reduce organic load. The rhizosphere of the plant supports advanced biodegradation and nutrient absorption. This system shows stability under tropical environmental conditions without requiring high energy input. The effluent quality meets the wastewater quality standards of the textile industry and some parameters meet the class I water quality criteria according to Government Regulation No.22 of 2021.

This study evaluates the technical and economic feasibility of the bentonite–TiO₂ bead and *Canna indica* integration systems through a design simulation at a capacity of 10 m³/day, as a conceptual scale-up stage from the results of the 95 L mesocosm test, for implementation in the field. The analysis was conducted by comparing the investment needs, operating costs, and energy consumption of several design alternatives. The results of the analysis show that operational costs are dominated by adsorbent use, while energy requirements are relatively low. The proposed modular design has the potential to be implemented in stages according to the treatment capacity and to support the reuse of water for non-consumption purposes.

The integration of bentonite–TiO₂ composite beads and *Canna indica* results in synergies between the adsorption, phytoremediation, and microorganism

activities processes in the root zone so that it can improve the efficiency and stability of textile wastewater treatment. The synergy reflects the principle of ecotechnology, namely the use of material and system engineering to optimize ecological mechanisms to improve water quality in a sustainable manner. The readiness level for the application of the technology is at level 5 because the concept, design, and performance of the system have been validated in the relevant environment through mesocosm scale testing and supported by technical and economic feasibility analysis. The modular concept developed provides the basis for the development of systems with larger capacities and their decentralized implementation, including at *non-source points*, tributaries, or water bodies with low discharge and controlled pollutant loads.

Keywords: adsorption, bentonite-TiO₂ composite, integrated ecotechnology, phytoremediation, textile wastewater treatment.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

RANCANG BANGUN SISTEM EKOTEKNOLOGI BERBASIS INTEGRASI *BEAD* BENTONIT DAN *Canna indica* UNTUK PENGOLAHAN AIR LIMBAH TEKSTIL

FIFIA ZULTI

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar

Doktor

Program Studi Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan

**ILMU PENGELOLAAN SUMBERDAYA ALAM DAN LINGKUNGAN
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

1. Prof. Dr.Ing. Ir. Suprihatin
2. Dr. Evi Susanti, M.T

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

1. Prof. Dr.Ing. Ir. Suprihatin
2. Dr. Evi Susanti, M.T



Judul Disertasi : Rancang Bangun Sistem Ekoteknologi Berbasis Integrasi *Bead*
Bentonit dan *Canna indica* untuk Pengolahan Air Limbah Tekstil

Nama : Fifi Zulti
NIM : P0602231010

@Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing 1
Prof. Dr. Dra. Dyah Iswantini Pradono,
M.ScAgr.



Pembimbing 2:
Prof.Dr.Ir. Anas Miftah Fauzi, M.Eng.



Pembimbing 3:
Prof.Dr. Dewi Sondari, M.Si.

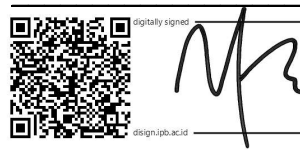


Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof Dr Lina Karlinasari, S.Hut, M.Sc,Ftrop.
NIP. 197311261998022001



Dekan Sekolah Pascasarjana:
Prof. Dr. Ir. Yusli Wardiatno, M.Sc.
NIP. 196607281991031002



Tanggal Ujian:
26 Juni 2026

Tanggal Lulus:
(tanggal penandatanganan oleh Dekan Sekolah
Pascasarjana)

Tanggal Sidang Promosi Terbuka:
14 Juli 2026

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang telah dilaksanakan pada bulan Juli 2024 - Oktober 2025 ini adalah teknologi pengolahan limbah, dengan judul Rancang Bangun Sistem Ekoteknologi Berbasis Integrasi *Bead* Bentonit dan *Canna indica* untuk Pengolahan Air Limbah Tekstil.

Terima kasih penulis ucapkan kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam proses penelitian. Ucapan terimakasih dan penghargaan sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada:

1. Prof. Dr. Dra. Dyah Iswantini Pradono, MScAgr., selaku ketua komisi pembimbing yang telah membimbing dan mengarahkan, serta memberikan saran dan masukan dalam penelitian
2. Prof. Dr. Ir. Anas Miftah Fauzi, M.Eng., selaku anggota komisi pembimbing yang telah memberikan arahan dan masukan dalam penelitian
3. Prof. Dr. Dewi Sondari, M.Si., selaku anggota komisi pembimbing yang telah memberikan arahan dan masukan dalam penelitian.
4. Ucapan terimakasih kepada institusi IPB University khususnya Sekolah Pasca Sarajana, kepada pimpinan dan jajarannya atas kesempatan, bantuan, dan kemudahan yang diberikana selama menjalani perkuliahan.
5. Ucapan terimakasih kepada Jajaran Pimpinan Program Studi Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, IPB University yang telah memberikan kesempatan akses ilmu, sarana dan prasarana pendukungnya.
6. Bapak/Ibu Dosen yang telah memberikan ilmu dan pengajaran yang bermanfaat selama proses perkuliahan.
7. Bapak Ibu Pimpinan penanggung jawab kegiatan *Degree by Research* (DBR) Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang telah mendukung secara finansial dalam program beasiswanya.
8. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada Alm.Ayah, Ibu, Suami serta anak-anak tercinta dan juga seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayangnya.
9. Bapak Ibu rekan-rekan PSL angkatan 2023 sebagai teman seperjuangan dalam menuntut ilmu di IPB University, yang telah memberikan dukungan dalam proses menyelesaikan jenjang doktoral.
10. Bapak Kepala Pusat Riset Limnologi dan Sumber Daya Air, BRIN atas izin dan restu dalam menempuh Pendidikan doktor ini.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Juni 2026

Fifia Zulti



DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xx
DAFTAR SINGKATAN DAN AKRONIM	xxi
DAFTAR ISTILAH	xxii
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Manfaat Penelitian	6
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	7
1.6 Kebaruan (<i>Novelty</i>)	7
II TINJAUAN PUSTAKA	12
2.1 Karakteristik dan Tantangan Air Limbah Tekstil	12
2.2 Bentonit dan Mekanisme Adsorpsinya	14
III METODE	18
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	18
3.2 Alat dan Bahan	18
3.3 Jenis, Sumber, dan Teknik Pengumpulan Data	18
3.4 Modifikasi Bentonit <i>Bead</i> dengan TiO_2	18
3.8 Analisis Mekanisme Adsorpsi	22
3.9 Analisis Nilai Ekonomi dari Sistem Ekoteknologi Terpadu	23
IV EVALUASI BENTONIT ALAMI DALAM SISTEM ADSORPSI TUNGGAL DAN TERINTEGRASI DENGAN TANAMAN UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH TEKSTIL	24
4.1 Pendahuluan	24
4.2 Metodologi Penelitian	25
4.2.1 Bahan	25
4.2.2 Kinerja Adsorpsi Bentonit pada Sistem <i>batch</i>	26
4.2.3 Desain dan Pengoperasian Sistem FCH	27
4.2.4 Uji Reusabilitas Bentonit	28
4.3 Hasil dan Pembahasan	28
4.3.1 Kinerja Bentonit dalam Menghilangkan COD dari Air Limbah Tekstil	28
4.3.2 Model Kinetika Adsorpsi	29
4.3.3 Analisis FTIR	30
4.3.4 Perbandingan Reduksi COD Air Limbah Tekstil dengan Air Limbah Sintetis Menggunakan Bentonit	31

4.3.5	Efisiensi reduksi COD dalam sistem FCH	32
4.3.6	Kinerja Reusabilitas Bentonit Setelah Regenerasi	36
4.3.7	Keterbatasan Penelitian dan Arah Pengembangan Selanjutnya	36
4.4	Kesimpulan	37
V	SINTESIS DAN KARAKTERISASI KOMPOSIT BENTONIT-TiO ₂ BERBASIS <i>BEAD</i> SERTA ANALISIS MEKANISME ADSORPSI PADA AIR LIMBAH TEKSTIL	38
5.1	Pendahuluan	38
5.2	Metodologi Penelitian	39
5.2.1	Bahan	39
5.2.2	Sintesis Komposit Bentonit-TiO ₂ melalui Impregnasi <i>Microwave</i>	39
5.2.3	Pembuatan <i>Bead</i>	40
5.2.4	Karakterisasi <i>Bead</i>	40
5.2.5	Percobaan Adsorpsi <i>Batch</i>	40
5.2.6	Analisis Kinetika Adsorpsi	41
5.2.7	Model Isoterm Adsorpsi	41
5.2.8	Analisis Termodinamika	41
5.2.9	Studi Regenerasi	42
5.2.10	Aplikasi Pada Air Limbah Tekstil	42
5.3	Hasil dan Pembahasan	42
5.3.1	Karakteristik Bentonit-TiO ₂ -Alginat <i>Bead</i>	42
5.3.2	Pengaruh Parameter Operasional terhadap Efisiensi Adsorpsi Zat Warna oleh <i>Bead</i>	47
5.3.3	Analisis Kinetika Adsorpsi	53
5.3.4	Analisis Isoterm Adsorpsi	56
5.3.5	Analisis Termodinamika Adsorpsi	60
5.3.6	Analisis Reusabilitas	61
5.3.7	Kinerja Pada Pengolahan Air Limbah Industri Tekstil	62
5.4	Kesimpulan	63
VI	KINERJA SISTEM EKOTEKNOLOGI TERPADU BERBASIS BENTONIT-TiO ₂ DAN <i>CANNA INDICA</i> DALAM PENINGKATAN KUALITAS LIMBAH TEKSTIL	65
6.1	Pendahuluan	65
6.2	Metodologi Penelitian	66
6.2.1	Bahan dan Limbah Tekstil	66
6.2.2	Desain Sistem Ekoteknologi Terpadu (SET)	66
6.2.3	Kondisi Operasi, Pengambilan Sampel dan Analisis Kualitas Air	67

6.2.4	Analisis Pertumbuhan Tanaman dan <i>Total Plate Count</i> (TPC)	68
6.3	Hasil dan Pembahasan	68
6.3.1	Kondisi Operasional Sistem Selama Periode Pengamatan	68
6.3.2	Kinerja Sistem dalam Penurunan Parameter Pencemar	69
6.3.3	Pertumbuhan Tanaman dan Produksi Biomassa	72
6.3.4	Aktivitas Mikroorganisme Berdasarkan <i>Total Plate Count</i> (TPC)	74
6.3.5	Evaluasi Kinerja Akhir Sistem	76
6.4	Kesimpulan	79
VII	ANALISIS TEKNO-EKONOMI DAN RANCANGAN SKALA INDUSTRI SISTEM ADSORPSI-FITOREMEDIASI UNTUK PENGOLAHAN AIR LIMBAH TEKSTIL	80
7.1	Pendahuluan	80
7.3	Hasil dan Pembahasan	82
7.4	Kesimpulan	89
VIII	PEMBAHASAN UMUM	90
8.1	Pendahuluan	90
8.2	Sintesis Konseptual Integrasi Adsorpsi-Fitoremediasi	90
8.3	Kontribusi Ilmiah Penelitian	94
8.4	Implikasi Rekayasa dan Kebijakan Industri	93
IX	KESIMPULAN DAN SARAN	95
9.1	Kesimpulan	95
9.2	Saran	96
	DAFTAR PUSTAKA	97
	LAMPIRAN	110
	RIWAYAT HIDUP	119

DAFTAR TABEL

1.1	Perkembangan aplikasi ekoteknologi FTW Hibrid pada Perairan Tercemar	10
2.1	Kandungan zat pencemar dalam air limbah industri tekstil	13
3.1	Matriks pencapaian tujuan penelitian	19
3.2	Analisis parameter kualitas air	22
4.1	Karakterisasi air limbah tekstil	26
4.2	Parameter model kinetika adsorpsi COD pada bentonit	30
5.1	Parameter kinertika untuk adsorpsi MB menggunakan <i>Bead</i> BA dan BTA	54
5.2	Parameter kinetika adsorpsi CR menggunakan <i>Bead</i> BA dan BTA	55
5.3	Parameter isoterm Langmuir dan Freundlich dari adsorpsi MB menggunakan komposit <i>bead</i>	56
5.4	Parameter isoterm Langmuir dan Freundlich pada komposit <i>bead</i> (BA dan BTA) dalam adsorpsi CR	57
5.5	Parameter Termodinamika Adsorpsi Zat Warna MB dan CR pada komposit <i>bead</i> BA dan BTA	60
6.1	Evaluasi parameter kualitas air limbah sebelum dan sesudah pengolahan dibandingkan dengan standar baku mutu	77
6.2	Komparasi efisiensi reduksi polutan pada sistem ekoteknologi	79
7.1	Asumsi dasar analisis ekonomi awal sistem	87



DAFTAR GAMBAR

1.1	Dasar pemilihan air limbah tekstil sebagai objek penelitian dan tantangan pengolahannya	2
1.2	Kerangka pemikiran penelitian	8
1.3	Visualisasi kata kunci yang sering muncul dalam ekoteknologi untuk pengolahan air limbah tekstil selama 21 tahun terakhir	9
2.1	Struktur bentonit (García <i>et al.</i> 2022)	15
3.1	Diagram alir penelitian	20
3.2	Konfigurasi reaktor Sistem SET yang mengintegrasikan tanaman <i>Canna indica</i> , media BTA, dan aerasi dalam sistem <i>batch</i> .	21
4.1	Desain FCH	27
4.2	(a) Perbandingan secara visual sebelum dan sesudah perlakuan serta (b) efisiensi reduksi (RE) bentonit setelah 4 jam pengadukan untuk menghilangkan COD dari air limbah tekstil	29
4.3	Grafik kinetika adsorpsi COD pada pengenceran 10% dan 30% model (a) PFO, dan (b) PSO.	30
4.4	Spektrum FTIR bentonit alami sebelum dan setelah digunakan untuk mengurangi polutan dalam air limbah tekstil.	31
4.5	Perbandingan efisiensi reduksi COD antara air limbah tekstil dan air limbah sintesis	32
4.6	Kinerja FCH untuk reduksi COD seiring waktu	33
4.7	Profil kualitas air di FCH meliputi pH (a), suhu (b), oksigen terlarut (c), konduktivitas (d), dan TDS (e)	34
4.8	Skema konseptual mekanisme reduksi COD pada bentonit alami dan sistem terintegrasi FCH–bentonit	35
4.9	Efisiensi reduksi COD oleh bentonit yang diregenerasi melalui tiga siklus adsorpsi	36
5.1	Karakterisasi FTIR <i>bead</i> BA (Bentonit-Alginat) dan BTA (Bentonit-TiO ₂ -Alginat)	43
5.2	Pola difraksi sinar-X (XRD) dari bentonit–alginat (BA) dan komposit bentonit–TiO ₂ –alginat (BTA)	44
5.3	Citra SEM (2.500×) dan EDX dari BA (bentonit–alginat), dan BTA (bentonit–TiO ₂ –alginat)	45
5.4	Isoterm adsorpsi–desorpsi N ₂ dari bentonit–alginat (BA) dan bentonit–TiO ₂ –alginat (BTA).	46
5.5	Pengaruh dosis adsorben terhadap efisiensi reduksi (RE) dan kapasitas adsorpsi (q) zat warna menggunakan komposit <i>bead</i>	48
5.6	Pengaruh variasi pH terhadap efisiensi reduksi (a) MB dan (b) CR menggunakan <i>bead</i> BA dan BTA	49
5.7	Pengaruh konsentrasi awal terhadap efisiensi reduksi (a) MB dan (b) CR menggunakan <i>bead</i> BA dan BTA	51

5.8	Pengaruh waktu kontak terhadap efisiensi reduksi (a) MB dan (b) CR menggunakan <i>bead</i> BA dan BTA	53
5.9	Perbandingan data eksperimen dan model (a) PFO dan (b) PSO untuk adsorpsi MB pada BA dan BTA. Data disajikan sebagai nilai rata-rata $\pm$ standard error ($n = 3$)	55
5.10	Perbandingan data eksperimen dan model PFO untuk adsorpsi CR menggunakan komposit <i>bead</i> (BA dan BTA). Data disajikan sebagai nilai rata-rata $\pm$ standard error ($n = 3$)	56
5.11	Perbandingan data eksperimen dan model isoterm Freundlich untuk adsorpsi MB menggunakan komposit <i>bead</i> (BA dan BTA)	57
5.12	Perbandingan data eksperimen dan model isoterm Freundlich untuk adsorpsi CR menggunakan komposit <i>bead</i> (BA dan BTA)	58
5.13	Mekanisme adsorpsi zat warna MB dan CR oleh komposit <i>bead</i> bentonit-TiO ₂ -alginat	59
5.14	Perbandingan efisiensi reduksi (RE, %) zat warna MB dan CR pada uji reusabilitas adsorben selama tiga siklus penggunaan	61
5.15	Penurunan konsentrasi dan efisiensi reduksi (RE) COD dalam limbah tekstil menggunakan komposit <i>bead</i> (BA dan BTA)	61
5.16	Penurunan (a) konsentrasi dan (b) efisiensi reduksi (RE) warna dalam limbah tekstil menggunakan komposit <i>bead</i> (BA dan BTA)	62
5.17	Penurunan (a) konsentrasi dan (b) efisiensi reduksi (RE) ammonium dalam limbah tekstil menggunakan komposit <i>bead</i> (BA dan BTA)	62
6.1	Rancangan SET dengan 4 perlakuan yaitu kontrol, bentonit <i>bead</i> -tanaman dipisah (BC-SEP), bentonit <i>bead</i> -tanaman digabung (BC-MIX), Tanaman <i>Canna indica</i> (<i>Canna</i>)	67
6.2	Nilai pH, suhu, dan konsentrasi DO pada sistem SET untuk seluruh perlakuan selama periode pengamatan	69
6.3	Efisiensi reduksi TSS, warna, COD, NH ₃ -N, nitrat dan fosfat pada SET selama 67 hari pengujian. Huruf berbeda (a, b) menunjukkan perbedaan signifikan antar perlakuan (ANOVA-Tukey, $\alpha = 0,05$), sedangkan notasi (*) hasil ANOVA yang menunjukkan tidak terdapa	72
6.4	Perbandingan tren reduksi (a) warna dan (b) COD terhadap waktu operasi sistem	73
6.5	Pertumbuhan <i>Canna indica</i> selama 28 hari pada berbagai perlakuan (BC-SEP, BC-MIX, dan <i>Canna</i>), meliputi (a) panjang akar, (b) batang, serta (c) persentase pertambahan biomassa akar, batang, dan daun.	74
6.6	Perbandingan <i>total plate count</i> (TPC) mikroorganisme pada sistem BC-MIX (<i>bead</i> bentonit-TiO ₂ -alginat + <i>Canna indica</i>) dan sistem <i>Canna indica</i> tanpa <i>bead</i> .	75



6.7

7.1
7.2
7.3
8.1
@Hak cipta milik IPB University

Karakteristik morfologi akar <i>Canna indica</i> dan BTA berdasarkan pengamatan SEM pada perbesaran 1000×. (a) akar <i>Canna indica</i> awal, (b) akar <i>Canna indica</i> yang berinteraksi dengan BTA setelah pengolahan, (c) akar <i>Canna indica</i> setelah pengolahan limbah tekstil	76
Desain reaktor SET sistem aliran konitnu tampak (a) atas, (b) samping, dan (c) 3 dimensi	84
Desain reaktor SET sistem aliran semi-kontinu tampak (a) atas, (b) samping, dan (c) 3 dimensi	85
Desain reaktor SET sistem integrasi adsorben-fitoremediasi dalam paket FTW tampak (a) atas, (b) samping, dan (c) 3 dimensi	86
Sintesis hasil penelitian dan implikasi keberlanjutan sistem ekoteknologi terpadu berbasis hidrogel bentonit–TiO ₂ dan <i>Canna indica</i> untuk pengolahan serta penggunaan kembali air limbah tekstil.	91

DAFTAR LAMPIRAN

1	Tahapan pembuatan <i>bead</i> BA dan BTA serta visualisasinya	111
2	Rekapitulasi kinerja <i>bead</i> komposit dan SET	1122
3	Analisis tekno ekonomi berdasarkan CAPEX dan OPEX	113

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR SINGKATAN DAN AKRONIM

APHA	American Public Health Association
BA	Bentonite-Alginate
BTA	Bentonite-TiO ₂ -Alginat
BC-MIX	Bentonite <i>Canna</i> Mixed
BC-SEP	Bentonite <i>Canna</i> Separated
BOD	Biochemical Oxygen Demand
BET	Brunauer–Emmett–Teller
CapEx	Capital Expenditure
COD	Chemical Oxygen Demand
CR	Congo Red
DO	Dissolved Oxygen
EPA	Environmental Protection Agency
EFB	Ecological Floating Bed
FCH	Floating Cage Hybrid
FTIR	Fourier Transform Infrared
FTW	Floating Treatment Wetland
HRT	Hydraulic Retention Time
MB	Methylene Blue
MBR	Membrane Bioreactor
OpEx	Operational Expenditure
PP	Peraturan Pemerintah
RE	Removal Efficiency
SEM	Scanning Electron Microscope
SET	Sistem Ekoteknologi Terpadu
TiO ₂	Titanium Dioxide
TSS	Total Suspended Solids
UV-Vis	Ultraviolet–Visible Spectrophotometry
WHO	World Health Organization
WQC	Water Quality Checker
XRD	X-Ray Diffraction

DAFTAR ISTILAH	
Istilah	Pengertian
Adsorben	Proses penempelan atau pengikatan molekul zat pencemar pada permukaan material adsorben melalui mekanisme fisik maupun kimia.
Alginat	Polimer alami berbasis polisakarida yang digunakan sebagai matriks pembentuk hidrogel dan enkapsulasi adsorben.
Bak ekualisasi	Bak penyeimbang untuk menstabilkan debit dan konsentrasi limbah sebelum pengolahan utama.
BC-MIX	Konfigurasi sistem FTW yang mengintegrasikan bentonite-TiO ₂ -alginate <i>bead</i> dan <i>Canna indica</i> dalam satu unit pengolahan.
BC-SEP	Konfigurasi sistem FTW dengan pemisahan unit adsorben dan unit tanaman dalam proses pengolahan limbah.
Bentonit	Mineral lempung yang didominasi oleh montmorillonite dan memiliki kapasitas adsorpsi tinggi terhadap berbagai polutan.
Biodegradasi	Proses penguraian senyawa organik oleh aktivitas mikroorganisme.
Biofilm	Lapisan mikroorganisme yang melekat pada permukaan material dan berperan dalam proses biodegradasi polutan.
BTA	Komposit adsorben berbentuk manik hidrogel yang tersusun dari bentonit, titanium dioksida (TiO ₂), dan alginat untuk pengolahan limbah.
CAPEX	Biaya investasi awal untuk pembangunan dan instalasi sistem.
Denitrifikasi	Proses reduksi nitrat menjadi gas nitrogen oleh mikroorganisme dalam kondisi anaerob.
Efisiensi reduksi	Persentase penurunan konsentrasi polutan dalam larutan, yang menunjukkan kinerja adsorben dalam menghilangkan kontaminan.
Fitoremediasi	Teknologi pemanfaatan tanaman untuk menyerap, menstabilkan, atau mendegradasi zat pencemar dalam air, tanah, atau sedimen.
Fotokatalitik	Proses percepatan reaksi kimia menggunakan material katalis yang diaktifkan oleh cahaya.
FTW	Sistem lahan basah terapung memanfaatkan tanaman air pada media terapung untuk memperbaiki kualitas air melalui proses biologis, fisik, dan kimia.

Hidrogel <i>bead</i>	Material berbentuk butiran tiga dimensi berbasis polimer hidrofilik (alginat) yang mampu menyerap air dan menyediakan matriks untuk distribusi adsorben.
HRT	Waktu rata-rata air limbah berada dalam sistem pengolahan.
Kontinu	Sistem operasi dengan aliran limbah yang berlangsung terus-menerus tanpa siklus pengosongan.
Nitrifikasi	Proses biologis oksidasi amonia menjadi nitrit dan nitrat oleh mikroorganisme aerob.
OPEX	Biaya operasional selama sistem dijalankan.
<i>Pre-treatment</i>	Tahap awal pengolahan limbah untuk mengurangi beban pencemar sebelum memasuki proses utama.
<i>Rhizodegradation</i>	Proses degradasi polutan oleh aktivitas mikroorganisme di zona akar tanaman.
Rizosfer	Zona di sekitar akar tanaman yang dipengaruhi oleh aktivitas biologis dan mikroorganisme.
SET	Sistem pengolahan limbah mengintegrasikan proses adsorpsi, fitoremediasi, dan proses biologis untuk meningkatkan efisiensi penghilangan polutan secara berkelanjutan.
<i>Scale-up</i>	Proses pengembangan sistem dari skala laboratorium atau pilot menuju skala industri.
Semi-kontinu	Sistem operasi yang menggabungkan proses <i>batch</i> dan aliran kontinu.
TiO ₂	Material semikonduktor yang memiliki aktivitas fotokatalitik dan digunakan untuk membantu degradasi senyawa organik.
<i>Water reuse</i>	Pemanfaatan kembali air hasil olahan untuk kebutuhan <i>non-potable</i> seperti irigasi, penyiraman lanskap, atau kebutuhan industri sekunder.