



# **REKAYASA PEMANFAATAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT SEBAGAI ADSORBEN UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH INDUSTRI KELAPA SAWIT TERINTEGRASI**

**ELSA WINDIASTUTI**



**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI PERTANIAN  
SEKOLAH PASCASARJANA  
INSTITUT PERTANIAN BOGOR  
BOGOR  
2024**

- 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.



## PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Rekayasa Pemanfaatan Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Adsorben untuk Pengolahan Limbah Industri Kelapa Sawit Terintegrasi” 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 2024

Elsa Windiastuti  
NIM F361190091

- 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.

## RINGKASAN

ELSA WINDIASTUTI. Rekayasa Pemanfaatan Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Adsorben untuk Pengolahan Limbah Industri Kelapa Sawit Terintegrasi. Dibimbing oleh SUPRIHATIN, NASTITI SISWI INDRASTI, YAZID BINDAR, UDIN HASANUDIN.

Industri kelapa sawit memiliki kontribusi yang besar terhadap perekonomian Indonesia. Produksi CPO tahun 2023 sebanyak 48,24 juta ton, nilai produksi CPO ini mengalami peningkatan sebanyak 5,5% dari tahun 2022. Selain CPO industri kelapa sawit juga menghasilkan limbah dalam jumlah yang cukup besar. Air limbah pabrik kelapa sawit (ALPKS) yang dihasilkan dari setiap ton produksi CPO berkisar 2,5-3,0 m<sup>3</sup>. Pengolahan ALPKS di industri kelapa sawit yaitu penanganan secara biologis dengan kolam anaerobik terbuka (*open deep lagoon*) atau unit biogas reaktor dilanjutkan dengan pengolahan secara aerobik. Namun metode tersebut memiliki beberapa kekurangan. Efluen Unit Biogas (*Palm Oil Mill Secondary Effluent/POMSE*) masih sering belum memenuhi standar mutu buangan industri CPO (sebagian besar sulit terdegradasi secara biologis, sehingga unit proses atau kombinasi unit proses non-biologis diperlukan untuk mengeliminasi polutan tersebut).

Selain ALPKS, industri kelapa sawit juga menghasilkan limbah padat. Limbah padat industri kelapa sawit terdiri atas tandan buah kosong, serat perasan buah, bungkil inti sawit, cangkang, dan limbah padat lain. Industri kelapa sawit umumnya memanfaatkan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebagai mulsa. Pemanfaatan TKKS sebagai mulsa kurang menguntungkan karena proses degradasi berjalan sangat lambat dan menimbulkan masalah lain seperti menjadi inang kumbang tanduk (*Oryctes rhinoceros*). Pemanfaatan TKKS lainnya dapat dilakukan dengan mengolah bersama ALPKS menjadi kompos (*co-composting*). Pengelolaan ALPKS dan TKKS secara terintegrasi berpotensi memberi berbagai manfaat, baik secara finansial maupun manfaat lingkungan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan teknologi proses pengolahan limbah pabrik kelapa sawit secara terintegrasi menuju penerapan konsep nir limbah (*zero-waste*). Inovasi ini menjadi solusi saling menguntungkan bagi pemecahan masalah pencemaran lingkungan dan masalah keterbatasan finansial untuk pengelolaan lingkungan industri kelapa sawit.

Proses aktivasi dilakukan dengan perlakuan *pretreatment* dan aktivasi secara *post treatment* dengan cara memanaskan TKKS menggunakan *autoclave* selama 90 menit. Selanjutnya dilakukan perendaman menggunakan NaOH atau KOH dengan konsentrasi 0%, 4%, 8% dan 12% selama 3 jam. Analisis daya serap iodine menggunakan metode titrimetri sedangkan uji daya serap metilen biru menggunakan metode spektrofotometri. Hasil daya serap iodine biochar dari TKKS berkisar antara 199,42-613,06 mg/g dan metilen biru sebesar 70,83-80,21 mg/g. Kemampuan biochar dalam menyerap iodine tidak memenuhi SNI yaitu minimal 750 mg/g. Daya serap metilen biru hasil penelitian ini adalah 62,53- 81,11mg/g, Biochar aktif yang dihasilkan memenuhi standar SNI yaitu 60 mg/g.

Proses aktivasi menyebabkan terjadinya perubahan gugus fungsi yaitu terbentuknya O-H (ikatan monomer/fenol), amina sekunder, regangan CN, dan komponen NH. Hasil analisis SEM menunjukkan ukuran pori biochar antara 2-10 µm. Biochar memiliki kandungan berupa C, O, P, K, dan Ca masing-masing sebesar



75,51%, 12,59%, 5,52%, 5,42%, dan 0,95%. Luas permukaan pori biochar *pretreatment* KOH 12% dan *post treatment* NaOH 8% masing-masing sebesar 8,2 m<sup>2</sup>/g dan 24,2 m<sup>2</sup>/g.

Hasil analisis kebutuhan energi biochar *pretreatment* sebesar 19,66 MJ/kg, sedangkan untuk menghasilkan 1 kg biochar *post treatment* membutuhkan energi sebesar 8,17 MJ. Net energi rasio (NER) biochar *pretreatment* sebesar 3,73 dan biochar *post treatment* sebesar 12,22. Net energi value (NEV) biochar *pretreatment* lebih rendah dibandingkan biochar *post treatment*, masing-masing sebesar 53,82 dan 91,75. Harga produksi biochar pirolisis tanpa perlakuan sebesar Rp. 4.768/kg, biochar *pretreatment* sebesar Rp. 80.667/kg, dan biochar *post treatment* sebesar Rp. 21.474/kg.

Proses elektrokoagulasi dilakukan dengan sistem *batch* menggunakan reaktor dari rangkaian *power supply*, voltmeter, gelas piala, batang elektroda aluminium, dan *magnetic stirrer*. Elektroda yang digunakan adalah aluminium berukuran 12x2 cm<sup>2</sup> dengan ketebalan lempeng 2 mm, disusun secara bipolar dengan jarak 1 cm antara elektroda. Variasi tegangan yang digunakan adalah 15, 20, dan 25 volt dengan waktu kontak selama 30, 60, dan 90 menit. Perlakuan terbaik didapat pada tegangan 15 volt selama 30 menit dengan efisiensi penyisihan COD, TSS, kekeruhan dan warna masing-masing sebesar 49,69%, 92,55%, 92,69% dan 75,77%. Elektrokoagulasi merupakan teknologi yang tergolong murah, kebutuhan energi 7,47 kWh/m<sup>3</sup>, kebutuhan elektroda sebesar 335,7 g/m<sup>3</sup> dan biaya operasional yang diperlukan adalah Rp.24.068/m<sup>3</sup>

Proses adsorpsi dilakukan menggunakan biochar teraktivasi dengan konsentrasi 0, 40, 80, dan 120 g/L. Waktu tunggu yang digunakan adalah 1, 3, dan 5 jam. Air limbah yang digunakan adalah efluen hasil proses elektrokoagulasi dengan tegangan 15 volt selama 30 menit. Efisiensi penjerapan biochar terhadap COD sebesar 82,29-95,74%, kekeruhan sebesar 74,96-93,89% dan warna sebesar 19,67-46,45%. Luas permukaan pori biochar mencapai 24,19 m<sup>2</sup>/g.

Proses adsorpsi terbaik didapat pada biochar *post treatment* dengan dosis 40g/L selama 1 jam. Efisiensi penurunan maksimum konsentrasi COD sebesar 86,5%, Kekeruhan 90,4% dan warna sebesar 46,5%. Hasil SEM-EDX menunjukkan pada biochar jenuh, terdapat senyawa Al dan Mg. Kombinasi proses elektrokoagulasi dan adsorpsi dapat meningkatkan efektivitas yang dimiliki setiap metode dalam proses pengolahan POMSE. Efisiensi COD, kekeruhan, dan penghilangan warna masing-masing sebesar 97,99%, 99,22%, dan 90,50%.

**Keyword:** adsorben, biochar, elektrokoagulasi, pengolahan limbah terintegrasi, pirolisis, TKKS.

## SUMMARY

ELSA WINDIASTUTI. Engineering of palm oil empty fruit bunches utilization as adsorbent in the integrated waste treatment of palm oil industries. Supervised by SUPRIHATIN, NASTITI SISWI INDRASTI, YAZID BINDAR, UDIN HASANUDIN

The palm oil industry is a significant contributor to the Indonesian economy. In 2017, palm oil exports reached 29.07 million tons and increased to 42.86 million tons in 2019. In addition to CPO, the palm oil industry produces large amounts of waste. The palm oil mill effluent (POME) generated from each ton of CPO production is approximately 2.5-3.0 m<sup>3</sup>. POME processing in the palm oil industry is biological treatment using open deep lagoons or biogas reactor units, but this method has several disadvantages. The biogas plant wastewater (palm oil mill secondary wastewater/POMSE) still does not meet the wastewater quality standards of the CPO industry (most of it is difficult to biodegrade, so a process unit or a combination of non-biological process units is required to eliminate these pollutants).

In addition to POMSE, the palm oil industry also produces solid waste. Solid waste from the palm oil industry consists of empty fruit bunches, fruit juice fibers, palm kernel meal, shells, and other solid wastes. The palm oil industry generally utilizes empty oil palm bunches (EFB) as mulch. The use of EFB as mulch is less profitable because the degradation process runs very slowly and causes other problems such as being a host for horn beetles (*Oryctes rhinoceros*). Other uses of EFB can occur through the joint processing of POME into compost (co-composting). The integrated management of POME and EFB can provide various financial and environmental benefits.

This research aims to develop a technology for integrated processing of palm oil mill waste to implement the zero-waste concept. This innovation is a win-win solution to the problem of environmental pollution and the problem of financial constraints on environmental management in the palm oil industry.

The activation process is carried out by *pretreatment* treatment and *post treatment* activation by heating EFB using an *autoclave* for 90 minutes. Furthermore, soaking using NaOH or KOH with a concentration of 0%, 4%, 8% and 12% for 3 hours. Analysis of iodine adsorption using Titrimetric method while methylene blue adsorption test using Spectrophotometric method. The adsorption of iodine biochar from EFB ranges from 199.42-613.06 mg/g and methylene blue by 70.83-80.21 mg/g. The ability of biochar to adsorb iodine does not meet SNI, which is at least 750 mg/g. The adsorption of methylene blue from this study is 62.53-81.11 mg/g, the resulting activation biochar meets SNI standards, which is 60 mg/g.

The activation process causes changes in functional groups, namely the formation of O-H (monomer/phenol bonds), secondary amines, CN strain, and NH components. The results of SEM analysis show the pore size of biochar between 2-10 µm. Biochar contains C, O, P, K, and Ca of 75.51%, 12.59%, 5.52%, 5.42%, and 0.95%, respectively. The pore surface area of 12% KOH pretreatment biochar and 8% NaOH post treatment was 8.2 m<sup>2</sup>/g and 24.2 m<sup>2</sup>/g respectively.

The results of the analysis of the energy requirements of pretreatment biochar are 19.66 MJ/kg, while to produce 1 kg of biochar post treatment requires energy





of 8.17 MJ. The net energy ratio (NER) of pretreatment biochar was 3.73 and post treatment biochar was 12.22. The net energy value (NEV) of pretreatment biochar was lower than post-treatment biochar, which was 53.82 and 91.75, respectively.

The production price of pyrolysis biochar without treatment is Rp. 4,768/kg, pretreatment biochar is Rp. 80,667/kg, and post treatment biochar is Rp. 21,474/kg.

The electrocoagulation process is carried out by a batch system using a reactor from a power supply circuit, a voltmeter, a trophy cup, an aluminum electrode rod, and a magnetic stirrer. The electrode used is aluminum measuring 12x2 cm with a plate thickness of 2 mm, arranged bipolarly with a distance of 1 cm between the electrodes. The voltage variations used are 15v, 20v, and 25 volts with contact times of 30, 60, and 90 minutes. The best treatment was obtained at a voltage of 15 volts for 30 minutes with the removal efficiency of COD, TSS, turbidity and color of 49.69%, 92.55%, 92.69% and 75.77% respectively. Electrocoagulation is a relatively cheap technology, energy needs are 7.47 kWh / m<sup>3</sup>, electrode needs are 335.7 g / m<sup>3</sup> and operational costs required are Rp. 24,068/ m<sup>3</sup>.

The adsorption process is carried out using activated biochar with concentrations of 0, 40, 80, and 120 g/L. The waiting time used is 1, 3, and 5 hours. The wastewater used is effluent resulting from the electrocoagulation process with a voltage of 15 volts for 30 minutes. The adsorption efficiency of biochar against COD is 82.29-95.74%, turbidity is 74.96-93.89% and color are 19.67-46.45%. The pore surface area of biochar reaches 24.19 m<sup>2</sup>/g.

The best adsorption process is obtained in *post treatment* biochar at a dose of 40g/L for 1 hour. The maximum reduction efficiency of COD concentration by 86.5%, Turbidity by 90.4% and color by 46.5%. The results of SEM-EDX show that in saturated biochar, there are Al and Mg compounds. The combination of electrocoagulation and adsorption processes can increase the effectiveness of each method in the POMSE processing process. COD, turbidity, and color removal efficiencies were 97.99%, 99.22%, and 90.50%, respectively.

**Keywords:** adsorbent, biochar, EFB, electrocoagulation, integrated waste processing, pyrolysis.



# **REKAYASA PEMANFAATAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT SEBAGAI ADSORBEN UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH INDUSTRI KELAPA SAWIT TERINTEGRASI**

**ELSA WINDIASTUTI**

Disertasi  
Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar  
Doktor pada  
Program Studi Teknik Industri Pertanian

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI PERTANIAN  
SEKOLAH PASCASARJANA  
INSTITUT PERTANIAN BOGOR  
BOGOR  
2024**

- 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 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. Ir. Moh. Yani, M.Eng
- 2 Dr. Dwindrata Basuki Aviantara M.S.M.C., C.EIA

**Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:**


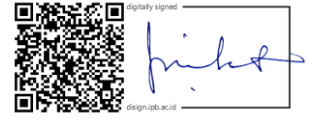
- 1 Prof. Dr. Ir. Moh. Yani, M.Eng
- 2 Dr. Dwindrata Basuki Aviantara M.S.M.C., C.EIA



Judul Disertasi : Rekayasa Pemanfaatan Tandan Kosong Kelapa Sawit  
Sebagai Adsorben untuk Pengolahan Limbah Industri  
Kelapa Sawit Terintegrasi  
Nama : Elsa Windiastuti  
NIM : F361190091

Disetujui oleh

Pembimbing 1:  
Prof. Dr. Ir. Suprihatin  
Pembimbing 2:  
Prof. Dr. Ir. Nastiti Siswi Indrasti  
Pembimbing 3:  
Prof. Ir. Yazid Bindar, M.Si., Ph.D  
Pembimbing 4:  
Prof. Dr. Ir. Udin Hasanudin, M.T.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:  
Prof. Dr. Ir. Illah Sailah, MS.  
NIP 19580521 198211 2 001  
Dekan Fakultas Teknologi Pertanian:  
Prof. Dr. Ir. Slamet Budijanto, M.Agr.  
NIP 19610502 198603 1 002



Tanggal Ujian:  
Sidang tertutup: 4 Juni 2024  
Sidang terbuka: 24 Juni 2024

Tanggal Lulus:



### @Hak cipta milik IPB University

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.

## PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Juni 2021 sampai bulan Juni 2023 ini ialah pemanfaatan limbah industri kelapa sawit secara terintegrasi, dengan judul “Rekayasa Pemanfaatan Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Adsorben untuk Pengolahan Limbah Industri Kelapa Sawit Terintegrasi”.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, Prof Dr Ir Suprihatin selaku Ketua Komisi Pembimbing, Prof Dr Ir Nastiti Siswi Indrasti, Prof Dr Ir Udin Hasanudin M.T, Prof Ir Yazid Bindar M.Si Ph.D selaku anggota Komisi Pembimbing atas kesabaran dan keikhlasannya dalam memberikan bimbingan, arahan, saran, dukungan moral serta waktu, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan.

Terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi yang telah memberikan beasiswa pendidikan pascasarjana (BPPDN) serta Hibah penelitian disertasi doktor tahun anggaran 2021 dan 2022. Penghargaan penulis sampaikan kepada Prof. Dr. I Nyoman Pugeg Aryantha Rektor Institut Teknologi Sumatera. Kepada rekan-rekan dosen Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera sebagai institusi tempat penulis bekerja atas izin tugas belajar yang diberikan selama ini. Di samping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada Kepala Laboratorium Teknologi Industri Pertanian, Institut Teknologi Sumatera dan Kepala Laboratorium Pengolahan Limbah Agroindustri Fakultas Pertanian Universitas Lampung yang telah memberi izin penelitian, beserta staf Laboratorium yang telah membantu selama pengumpulan data.

Ungkapan syukur dan terima kasih untuk keluarga tercinta Bapak Suwandi dan Ibu Wiwik Winarni yang tanpa henti mendoakan dan mendampingi dalam setiap langkah yang dijalani. Bapak & Ibu mertua, Kakak, Adik dan Ipar terima kasih atas dukungan tanpa henti di setiap kondisi terutama untuk ikatan persaudaraan yang luar biasa. Suami tercinta Muhammad Asri, S.Sos., M.Si terima kasih telah mengizinkan, meridhoi, mendukung lahir dan batin untuk jalan yang ditempuh ini, dan anak-anak El Thariq Danadyaksa Ocean dan Arung Panrita Ocean atas pengertian dan senantiasa memberi semangat dan dukungan tanpa batas, Cinta tulus, dan kasih yang tak ternilai.

Pak Candra yang senantiasa membantu mengatasi administrasi. Seluruh teman-teman pada Program Studi Teknik Industri Pertanian IPB angkatan 2019 terima kasih atas segala bantuan, dukungan dan kebersamaan hingga penyelesaian disertasi ini.

Penulis menyadari masih terdapat berbagai kekurangan dalam hasil penelitian maupun penulisan disertasi ini. Semoga karya ilmiah ini bermanfaat dan memberikan kontribusi nyata terhadap perkembangan ilmu pengetahuan

Bogor, Juli 2024

*Elsa Windiastuti*



### @Hak cipta milik IPB University

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 ISI

DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
<b>I PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan	6
1.4 Manfaat	6
1.5 Ruang Lingkup	6
1.6 Kebaruan ( <i>novelty</i> )	7
1.7 Hipotesis	7
<b>II METODE</b>	<b>10</b>
2.1 Waktu dan Tempat Penelitian	11
2.2 Alat dan Bahan	11
2.3 Prosedur Kerja	11
<b>III HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	<b>18</b>
3.1 Proses Produksi dan Karakteristik Biochar TKKS	18
3.2 Pengolahan Air limbah Pabrik Kelapa Sawit Menggunakan Metode Elektrokoagulasi	32
3.3 Pengolahan Efluen Elektrokoagulasi Menggunakan Biochar Teraktivasi dengan Metode Adsorpsi	39
3.4 Konsep Pengolahan Limbah Pabrik Kelapa Sawit Terintegrasi	48
3.5 Pengaruh Kombinasi Metode Elektrokoagulasi dan Adsorpsi Terhadap Peningkatan Kualitas Air limbah Pabrik Kelapa Sawit	61
<b>IV SIMPULAN DAN SARAN</b>	<b>66</b>
4.1 Simpulan	70
4.2 Saran	70
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN	85
RIWAYAT HIDUP	106

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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.





## DAFTAR TABEL

1	Kombinasi jenis aktivator dan konsentrasi	12
2	Karakteristik Serapan IR Pada Setiap Sampel	28
3	Luas permukaan pori berdasarkan uji BET.	31
4	Karakteristik POMSE sebelum dan setelah elektrokoagulasi	32
5	Analisis proksimat busa dan endapan elektrokoagulasi	39
6	Karakteristik efluen setelah proses adsorpsi	40
7	Unsur pada biochar berdasarkan uji EDX	44
8	Analisis <i>Ultimate</i>	45
9	Energi input dan output produksi 1 kg biochar	49
10	Kebutuhan biaya untuk memproduksi 1 kg biochar berbagai perlakuan	51
11	Pengaruh suhu pirolisis terhadap rendemen biochar, <i>biooil</i> dan <i>syngas</i>	55
12	Karakteristik biochar aktif biomassa dan metode aktivasi yang berbeda	57
13	Proses elektrokoagulasi dengan tegangan dan waktu kontak yang berbeda	59
14	Adsorpsi menggunakan berbagai adsorben dan kondisi yang berbeda	60
15	Pengaruh Elektrokoagulasi dan Adsorpsi terhadap efisiensi penyisihan polutan	64
16	Kelebihan dan kekurangan dari kombinasi elektrokoagulasi dan adsorpsi.	66

## DAFTAR GAMBAR

1	<i>Systematic literature review</i> penelitian pengolahan limbah industri kelapa sawit secara terintegrasi	9
2	Alur kerangka pikir penelitian	10
3	Kerangka pikir penelitian teknologi pengolahan limbah terintegrasi	11
4	Tahapan penelitian	12
5	Diagram alir produksi biochar	13
6	Diagram skematis pada reaktor elektrokoagulasi batch	15
7	Prosedur proses elektrokoagulasi sistem <i>batch</i>	16
8	Diagram alir proses adsorpsi	17
9	Pengaruh perlakuan tanpa aktivasi, aktivasi <i>pretreatment</i> dan aktivasi <i>post treatment</i> terhadap kadar air biochar	20
10	Pengaruh perlakuan tanpa aktivasi, aktivasi <i>pretreatment</i> dan aktivasi <i>post treatment</i> terhadap kadar abu biochar	21
11	Pengaruh perlakuan tanpa aktivasi, aktivasi <i>pretreatment</i> dan aktivasi <i>post treatment</i> terhadap kadar zat mudah menguap biochar	23
12	Pengaruh perlakuan tanpa aktivasi, aktivasi <i>pretreatment</i> dan aktivasi <i>post treatment</i> terhadap kadar karbon terikat biochar	24
13	Pengaruh perlakuan tanpa aktivasi, aktivasi <i>pretreatment</i> dan aktivasi <i>post treatment</i> terhadap daya serap iodine biochar	25
14	Pengaruh perlakuan tanpa aktivasi, aktivasi <i>pretreatment</i> dan aktivasi <i>post treatment</i> terhadap daya serap metilen biru biochar	26
15	Spektrum FTIR Biochar pirolisis tanpa aktivasi, biochar aktivasi <i>pretreatment</i> dan biochar aktivasi <i>post treatment</i>	28

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.

16	Perbandingan morfologi biochar pada pembesaran 5000x (a) Biochar pirolisis tanpa aktivasi, (b) Biochar aktivasi secara <i>pretreatment</i> dengan konsentrasi KOH 12%, (c) Biochar aktivasi secara <i>Post treatment</i> dengan konsentrasi NaOH 8%.	29
17	Penampakan POMSE sesaat setelah dilakukan elektrokoagulasi	33
18	Pengaruh waktu elektrokoagulasi POMSE terhadap penurunan COD	33
19	Pengaruh waktu elektrokoagulasi POMSE terhadap penurunan TSS	35
20	Pengaruh waktu elektrokoagulasi POMSE terhadap penurunan kekeruhan	36
21	Pengaruh Elektrokoagulasi terhadap pH	36
22	Pengaruh waktu elektrokoagulasi POMSE terhadap nilai warna	37
23	Perubahan warna air limbah kelapa sawit (a) POMSE sebelum diberikan perlakuan, (b) efluen elektrokoagulasi pada tegangan 25 volt selama 30 menit	38
24	Pengaruh waktu adsorpsi efluen elektrokoagulasi menggunakan biochar TKKS terhadap penurunan nilai COD	41
25	Pengaruh waktu adsorpsi efluen elektrokoagulasi menggunakan biochar TKKS terhadap penurunan kekeruhan	42
26	Pengaruh waktu adsorpsi efluen elektrokoagulasi menggunakan biochar TKKS terhadap penurunan warna	43
27	Spektrum EDX biochar TKKS (a) spektrum biochar <i>Post treatment</i> NaOH 8% sebelum digunakan untuk adsorpsi, (b) spektrum biochar <i>Post treatment</i> NaOH 8% setelah digunakan untuk adsorpsi efluen elektrokoagulasi pada konsentrasi 40g/L selama 1 jam	43
28	Morfologi biochar TKKS (a, b) morfologi biochar <i>post treatment</i> sebelum digunakan sebagai adsorben, (c, d) morfologi biochar <i>post treatment</i> setelah digunakan sebagai adsorben efluen elektrokoagulasi pada konsentrasi 40 g/L selama 1 jam.	44
29	(a) Model kinetik orde pertama, (b) model kinetik orde kedua pada biochar <i>post treatment</i>	46
30	(a) Kurva adsorpsi isoterm Freundlich, (b) kurva adsorpsi isoterm Langmuir pada biochar <i>post treatment</i> 40g/L	47
31	Rancangan reaktor pirolisis	50
32	Rancangan rangkaian alat Pirolisis	50
33	Rancangan reaktor elektrokoagulasi	53
34	Rancangan reaktor adsorpsi	54
35	Rekomendasi tahapan dan kondisi proses produksi biochar	58
36	Konsep pengolahan limbah industri kelapa sawit terintegrasi	63
37	Perubahan warna POMSE secara visual, (a) POMSE awal tanpa perlakuan, (b) efluen elektrokoagulasi, (c) efluen adsorpsi pada konsentrasi 40g/L selama 1 jam.	64

## DAFTAR LAMPIRAN

1	Prosedur pengujian biochar menurut SNI Arang aktif teknis	85
2	Data karakteristik Biochar aktivasi <i>pretreatment</i> dan <i>post treatment</i> dengan aktivator NaOH dan KOH.	89
3	Spektrum SEM-EDX Biochar Sebelum dan Setelah Adsorpsi	90



4

Data efluen elektrokoagulasi dengan perlakuan tegangan dan waktu 91

5

Data adsorpsi efluen elektrokoagulasi menggunakan biochar  
*pretreatment* dan *post treatment* 92

6

Estimasi neraca massa dan perhitungan biaya produksi biochar 93

7

Perhitungan kebutuhan biaya proses elektrokoagulasi 98

8

Perhitungan biaya secara terintegrasi 100

Hak cipta milik IPB University

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.