

OPTIMASI PENGOLAHAN LIMBAH CAIR KELAPA SAWIT MELALUI INTEGRASI UNIT *ROTATING BIOLOGICAL* *CONTACTOR* DAN ADSORPSI SERAT LIGNOSELULOSA

RAIS RAHMADI



**DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL DAN LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNOLOGI PERTANIAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2024**

@Hak cipta milik IPB University

IPB University





PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Optimasi Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit Melalui Integrasi Unit *Rotating Biological Contactor* dan Adsorpsi Serat Lignoselulosa” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun 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 skripsi ini.

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

Bogor, Agustus 2024

Rais Rahmadi
F4501231018



@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.



@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.



RINGKASAN

RAIS RAHMADI. Optimasi Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit Melalui Integrasi Unit *Rotating Biological Contactor* dan Adsorpsi Serat Lignoselulosa. Dibimbing oleh ALLEN KURNIAWAN, ARIEF SABDO YUWONO, dan SITI WIKMATIN.

LCKS dan TKKS berkontribusi sekitar 73% dari total limbah pabrik kelapa sawit. Proses pengolahan LCKS dianalisis melalui pendekatan pengolahan biologis dengan RBC dan serat TKKS sebagai media adsorpsi. Upaya adaptasi terhadap kasus, pengaruh HRT perlu diidentifikasi melalui model biokinetika. Penelitian ini menyelidiki efisiensi pengolahan LCKS dan upaya optimasi melalui skenario HRT yang berbeda. Temuan menunjukkan bahwa kombinasi unit RBC dan serat TKKS mampu mengurangi semua parameter polutan. Namun, beberapa hasil pengoperasian unit tunggal akan menambah konsentrasi polutan. Pengoperasian RBC pada HRT yang lebih lama (30 jam) menunjukkan kinerja pengolahan yang lebih baik daripada HRT singkat (10, 20 jam). Serat TKKS melalui morfologi dan kimia permukaannya bisa berkontribusi terhadap penurunan konsentrasi polutan. Bakteri *C.vitaeruminis* mendominasi sebagai mikroorganisme pengolahan substrat LCKS. Model biokinetika yang dikembangkan dengan pengaruh pH dan temperatur telah presisi dalam prediksi hasil pengolahan melalui uji validasi, sensitivitas dan statistik. Upaya optimasi bisa dilakukan dengan penyesuaian parameter biokinetika dan operasional.

Kata kunci: *hydrolic retention time* (HRT), limbah cair kelapa sawit (LCKS), model biokinetika, *rotating biological contactor* (RBC), tandan kosong kelapa sawit (TKKS)



@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.



SUMMARY

RAIS RAHMADI. Optimization of Palm Oil Liquid Effluent Processing Through the Integration of Rotating Biological Contactor Units and Lignocellulosic Fiber Adsorption. Supervised by ALLEN KURNIAWAN, ARIEF SABDO YUWONO, and SITI NIKMATIN.

POME and OPEFB contribute 73% of the total waste from palm oil mills. The treatment of POME was analyzed using a biological treatment approach with RBC and OPEFB fibers as adsorption media. In adapting to cases, influence of HRT needs to be identified through a biokinetic model. This study investigated the efficiency of POME treatment and optimization efforts through different HRT scenarios. The findings indicated that combination of RBC units and OPEFB fibers effectively reduced all pollutant parameters. However, operating single units sometimes increased pollutant concentrations. RBC operation at a longer HRT showed better treatment performance than shorter HRT. The morphology and surface chemistry of OPEFB fibers contributed to pollutant concentration reduction. *C.vitaeruminis* bacteria dominated as microorganism for POME substrate treatment. The developed biokinetic model, considering pH-temperature effects, accurately predicted treatment outcomes through validation, sensitivity, and statistical tests. Optimization can be made by adjusting biokinetic and operational parameters.

Keywords: biokinetic model, hydraulic retention time (HRT), oil palm empty fruit bunches (OPEFB), palm oil mill effluent (POME), rotating biological contactor (RBC)



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 2024
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.



OPTIMASI PENGOLAHAN LIMBAH CAIR KELAPA SAWIT MELALUI INTEGRASI UNIT *ROTATING BIOLOGICAL CONTACTOR* DAN ADSORPSI SERAT LIGNOSELULOSA

RAIS RAHMADI

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Teknik pada
Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan

**DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL DAN LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNOLOGI PERTANIAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2024**



@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.

Tim Penguji pada Ujian Tesis:

1. Ir. Ahmad Soleh Setiyawan, S.T., M.T., Ph.D.

- 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.

Judul Penelitian : Optimasi Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit Melalui Integrasi Unit *Rotating Biological Contactor* dan Adsorpsi Serat Lignoselulosa

Nama : Rais Rahmadi

NIM : F4501231018

Disetujui oleh

Dosen Pembimbing 1

Dr. Eng. Ir. Allen Kurniawan, S.T., M.T.

NIP. 19820729 201012 1 005

Dosen Pembimbing 2

Prof. Dr. Ir. Arief Sabdo Yuwono, M.Sc.

NIP. 19660321 199003 1 012

Dosen Pembimbing 3

Dr. Siti Nikmatin, S.Si, M.Si.

NIP. 19750819 200012 2 001



Diketahui oleh

Ketua Program Studi

Dr. Satyanto Krido Saptomo, S.T.P., M.Si.

NIP. 19730411 200501 1 002

Dekan Fakultas Teknologi Pertanian

Prof. Dr. Ir. Slamet Budijanto, M.Agr.

NIP. 19610502 198603 1 002



Tanggal Ujian:
26 Juli 2024

Tanggal Pengesahan:
16 Agustus 2024



@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 SWT atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah berjudul “Optimasi Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit Melalui Integrasi Unit *Rotating Biological Contactor* dan Adsorpsi Serat Lignoselulosa” ini berhasil diselesaikan. Tesis ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar magister teknik di Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor.

Penulis menyadari bahwa karya ilmiah ini dapat diselesaikan karena dukungan dan doa dari berbagai pihak. Ungkapan terima kasih spesial, dikhususkan kepada:

1. Allah SWT yang senantiasa memberikan anugrah dalam kehidupan penulis
2. Kedua orang tua yaitu Bapak Sugeng Hariadi, S.Pd. dan Ibu Masmurhoh Allatifah, S.Pd serta kakak Robbi Gunawan, S.Pd. yang telah memberikan dukungan, semangat, doa serta motivasi
3. Bapak Dr. Eng. Ir. Allen Kurniawan, S.T., M.T., Bapak Prof. Dr. Ir. Arief Sabdo Yuwono, M.Sc., dan Ibu Dr. Siti Nikmatin, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing yang telah mengarahkan dan membimbing selama pelaksanaan penelitian dan penulisan karya ilmiah
4. Ibu Ariani Dwi Astuti, S.T., M.T., Ph.D. dan Ibu Puteri Kusuma Wardhani, S.T., M.Sc., Ph.D. yang turut membimbing dalam program riset kolaborasi nasional
5. Bapak Ir. Ahmad Soleh Setiyawan, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen penguji
6. IPB University yang turut mendanai dan menyukseskan penelitian ini melalui program riset kolaborasi nasional
7. PT. Perkebunan Nusantara VIII Cigudeg, Bogor untuk izin pengambilan sampel limbah cair kelapa sawit
8. Irbati Sistha Hasnani, S.T. atas kasih sayang, bantuan dan doa yang diberikan
9. Alimah Hasyiyati Sahda, S.T. sebagai mitra penelitian yang telah memberikan dukungan, dan bantuan selama pengambilan data penelitian dan penyelesaian tesis
10. Allifiya Salsabil Nugrohoputri, S.T., Aliyah Baida Wiwiyanti, S.T., Dzaki Nauval, S.T., dan Ahmad Rijani Hasby, S.T., sebagai teman seperjuangan untuk segala bantuan, semangat dan kerjasama

Bogor, Agustus 2024

Rais Rahmadi

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 ISI

DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR NOTASI	xvi
GLOSARIUM	xvii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	4
II METODE	5
2.1 Waktu dan Tempat Penelitian	5
2.2 Alat dan Bahan	5
2.3 Prosedur Penelitian	7
2.3.1 Pembuatan Reaktor	8
2.3.2 <i>Seeding</i> dan Aklimatisasi	10
2.3.3 Pengujian Kinerja Unit Pengolahan	10
2.4 Analisis Data Pengolahan LCKS	12
2.4.1 Pengembangan Pemodelan Biokinetika	12
2.4.2 Pengaplikasian <i>Visual Basic Application</i>	14
2.4.3 Uji Kinerja Model Biokinetika	15
2.4.4 Analisis Sensitivitas	16
2.5 Analisis TKKS	16
2.6 Analisis Mikroorganisme RBC	17
2.6.1 Dominasi Spesies Mikroorganisme	17
2.6.2 Identifikasi Spesies Mikroorganisme	17
2.6.3 Analisis Bioinformatika	18
III HASIL DAN PEMBAHASAN	19
3.1 Karakteristik Limbah Cair Kelapa Sawit	19
3.2 Karakteristik Tandan Kosong Kelapa Sawit	19
3.2.1 Morfologi Permukaan	19
3.2.1 Kimia Permukaan	21
3.3 <i>Seeding</i> dan Aklimatisasi	23
3.4 Kinerja Unit Pengolahan	25
3.4.1 Kinerja Unit Pengolahan Terhadap Konsentrasi SCOD	25
3.4.2 Kinerja Unit Pengolahan Terhadap Konsentrasi TSS	27
3.4.3 Kinerja Unit Pengolahan Terhadap Konsentrasi Minyak Lemak	28
3.4.4 Kinerja Unit Pengolahan Terhadap Konsentrasi pH	30
3.4.4 Kinerja Unit Pengolahan Terhadap Parameter Lainnya	31
3.5 Evaluasi Kinerja Reaktor	33
3.6 Analisis Mikroorganisme RBC	33
3.6.1 Kuantitas Mikroorganisme	33

3.6.2 Identifikasi Spesies dan Bioinformatika	34
3.7 Analisis Estimasi Nilai Parameter Biokinetika	36
3.8 Uji Validasi dan Statistik Model Biokinetika	38
3.9 Uji Sensitivitas Parameter Biokinetika dan Operasional	40
3.10 Optimasi Pengolahan LCKS	41
IV SIMPULAN DAN SARAN	46
4.1 Simpulan	46
4.2 Saran	46
DAFTAR PUSTAKA	47
LAMPIRAN	53
RIWAYAT HIDUP	61

DAFTAR TABEL

2.1 Karakteristik kimia serat TKKS utuh	6
2.2 Komposisi unsur serat TKKS metode <i>milling</i>	7
2.3 Perhitungan parameter operasi variasi waktu detensi RBC	11
3.1 Perbandingan karakteristik LCKS dengan baku mutu	19
3.2 Nilai parameter biokinetika	37

DAFTAR GAMBAR

2.1 Reaktor modifikasi RBC dan adsorpsi serat TKKS	5
2.2 Tahap pelaksanaan penelitian	7
2.3 Unit modifikasi RBC	8
2.4 Unit adsorpsi serat TKKS	9
2.5 Rangkaian elektronika motor	9
2.6 Rangkaian elektronika pompa	10
2.7 Keseimbangan debit dan massa serta titik pengambilan sampel	11
2.8 Tampilan penerapan solver dan VBA pada Mic.Excel	15
3.1 SEM TKKS permukaan serat (a) <i>stalk</i> (b) <i>spikelet</i>	20
3.2 FTIR TKKS serat (a) <i>spikelet</i> (b) <i>stalk</i>	21
3.3 Reaktor (a) sebelum pengoperasian (b) setelah pengoperasian	23
3.4 <i>Seeding</i>	24
3.5 Aklimatisasi	25
3.6 Konsentrasi SCOD terhadap variasi HRT RBC	26
3.7 Konsentrasi TSS terhadap variasi HRT RBC	28
3.8 Konsentrasi minyak lemak terhadap variasi HRT RBC	29
3.9 Nilai pH terhadap variasi HRT RBC	30
3.10 Pohon filogenetik sampel	35
3.11 <i>Corynebacterium vitaeruminis</i>	35
3.12 Perbandingan konsentrasi SCOD pengukuran dan prediksi	39
3.13 Kontribusi parameter (a) biokinetika dan (b) operasional	41
3.14 Pengaruh parameter operasional terhadap SCOD influen	42
3.15 Pengaruh parameter biokinetika terhadap SCOD influen	43
3.16 Pengaruh faktor lingkungan terhadap SCOD Influen	44



DAFTAR NOTASI

θ_i	= Waktu detensi [T]
$\mu_{mx a}$	= Laju pertumbuhan spesifik maksimum biomassa melekat [T] ⁻¹
$\mu_{mx s}$	= Laju pertumbuhan spesifik maksimum biomassa tersuspensi [T] ⁻¹
A_b	= Total luas permukaan disk [L] ²
K_o	= Koefisien setengah saturasi monod untuk oksigen [M][L] ⁻³
K_s	= Koefisien setengah saturasi monod biomassa tersuspensi [M][L] ⁻³
K_u	= Koefisien setengah saturasi monod biomassa melekat [M][L] ⁻³
O^*	= Konsentrasi saturasi oksigen [M][L] ⁻³
S_o	= Konsentrasi substrat masuk [M][L] ⁻³
S_e	= Konsentrasi substrat keluar [M][L] ⁻³
t	= Waktu [T]
V	= Volume reaktor [L] ³
X_a	= Konsentrasi spesifik biomassa melekat [M][L] ⁻²
X_s	= Konsentrasi spesifik biomassa tersuspensi [M][L] ⁻³
Y_a	= Laju pertumbuhan sintesis sel untuk biomassa melekat
Y_s	= Laju pertumbuhan sintesis sel untuk biomassa tersuspensi

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.



GLOSARIUM

Aklimatisasi	=	Proses adaptasi mikroorganisme terhadap kondisi lingkungan dan LCKS pada RBC.
Biomassa	=	Total jumlah mikroorganisme hidup dan aktif pada RBC yang berperan dalam degradasi bahan organik.
Efisiensi penyisihan	=	Kemampuan RBC untuk mengurangi konsentrasi polutan dalam LCKS melalui proses degradasi oleh biomassa.
Laju pengolahan	=	Kecepatan pengolahan LCKS dalam melakukan proses degradasi oleh biomassa.
Model biokinetika	=	Model matematika yang menggambarkan respons dan interaksi antara mikroorganisme, nutrisi, dan parameter lingkungan dalam pengolahan LCKS.
One-way ANOVA	=	Analisis statistik yang digunakan untuk membandingkan rata-rata antara kelompok yang berbeda dan menguji adanya perbedaan signifikan.
Parameter biokinetika	=	Parameter yang diperoleh melalui pengembangan pemodelan biokinetika, yang mencerminkan karakteristik pertumbuhan dan metabolisme mikroorganisme dalam pengolahan LCKS.
Polutan	=	Zat-zat yang tidak diinginkan atau berbahaya dalam LCKS dan perlu dikurangi konsentrasinya.
Rotating Biological Contactor (RBC)	=	Reaktor yang digunakan dalam pengolahan LCKS dengan menggunakan mikroorganisme melekat pada media berpori untuk degradasi bahan organik.
Seeding	=	Pengembangbiakan mikroorganisme pada RBC untuk memulai populasi mikroba aktif pengolahan LCKS
Substrat	=	Bahan organik yang menjadi sumber nutrisi bagi mikroorganisme dalam RBC untuk melakukan degradasi dalam pengolahan LCKS.
Sum of Squared Deviations (SSD)	=	Metode statistik yang digunakan untuk mengukur kecocokan data dengan menghitung jumlah selisih kuadrat antara nilai pengamatan dan nilai prediksi.
Uji sensitivitas	=	Analisis yang dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan pada variabel tertentu terhadap hasil dan kinerja dalam pengolahan LCKS.
Validasi kelaikan	=	Proses memeriksa dan memverifikasi kesesuaian model biokinetika dalam menggambarkan dan memprediksi pengolahan LCKS berdasarkan data pengukuran.
Waktu detensi	=	Waktu yang dibutuhkan limbah cair untuk tinggal di dalam unit pengolahan. Waktu detensi merupakan perbandingan antara volume unit dan debit.



@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.