

# **ANALISIS POTENSI DAN KEBERLANJUTAN SUMBER-SUMBER ENERGI BERBASIS LIMBAH KELAPA SAWIT DENGAN PENDEKATAN *LIFE CYCLE SUSTAINABILITY ASSESSMENT***

**FARADILLAH RAYNITA YUSUF**



**TEKNIK INDUSTRI PERTANIAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI PERTANIAN  
INSTITUT PERTANIAN BOGOR  
BOGOR  
2025**



- 

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

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Analisis Potensi dan Keberlanjutan Sumber-Sumber Energi Berbasis Limbah Kelapa Sawit dengan Pendekatan *Life Cycle Sustainability Assessment*” 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 tesis ini.

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

Bogor, April 2025

Faradillah Raynita Yusuf  
F3501231025

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan 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.



## RINGKASAN

FARADILLAH RAYNITA YUSUF. Analisis Potensi dan Keberlanjutan Sumber-Sumber Energi Berbasis Limbah Kelapa Sawit dengan Pendekatan *Life Cycle Sustainability Assessment*. Dibimbing oleh Suprihatin dan Nastiti Siswi Indrasti.

Industri kelapa sawit merupakan salah satu sektor utama dalam perekonomian Indonesia, tetapi juga menjadi penyumbang signifikan terhadap dampak lingkungan. Proses produksi *crude palm oil* (CPO) menghasilkan berbagai limbah, baik padat maupun cair, yang jika tidak dikelola dengan baik dapat menyebabkan pencemaran lingkungan dan peningkatan emisi gas rumah kaca. Limbah utama dari industri ini meliputi tandan kosong kelapa sawit (TKKS), cangkang, serat, dan limbah cair atau *palm oil mill effluent* (POME). TKKS dan limbah padat lainnya sering kali hanya ditumpuk atau dibakar, yang dapat meningkatkan emisi karbon, sementara POME yang memiliki kandungan *chemical oxygen demand* (COD) dan *biological oxygen demand* (BOD) tinggi berisiko mencemari sumber air jika dibuang tanpa pengolahan yang memadai. Pemanfaatan limbah dapat dilakukan dengan mengonversi menjadi berbagai produk bioenergi, seperti pupuk organik, biochar, biogas, dan biodiesel, yang tidak hanya mengurangi dampak lingkungan tetapi juga memberikan nilai tambah bagi industri kelapa sawit.

Pada penelitian ini, pendekatan *life cycle sustainability assessment* (LCSA) digunakan untuk menganalisis potensi pemanfaatan limbah kelapa sawit sebagai sumber energi terbarukan secara holistik. LCSA mengintegrasikan tiga metode analisis utama: *life cycle assessment* (LCA) untuk mengukur dampak lingkungan dari setiap jalur pemanfaatan limbah, *life cycle costing* (LCC) untuk menilai biaya produksi dan keekonomian teknologi yang diterapkan, serta *social life cycle assessment* (S-LCA) untuk mengidentifikasi dampak sosial yang dihasilkan dari sistem bioenergi berbasis limbah kelapa sawit. Dengan pendekatan ini, penelitian dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai opsi terbaik dalam pemanfaatan limbah industri kelapa sawit yang paling berkelanjutan dari sisi lingkungan, ekonomi, dan sosial. Selain itu, LCSA juga membantu dalam menentukan skenario perbaikan untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi dampak negatif dari setiap jalur konversi bioenergi.

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengidentifikasi potensi perbaikan dalam pemanfaatan limbah kelapa sawit menjadi bioenergi dengan mempertimbangkan dampak lingkungan dan ekonomi dari berbagai skenario pemanfaatan. Studi ini dilakukan pada tiga industri kelapa sawit di Indonesia, dengan fokus pada karakterisasi limbah, analisis konversi bioenergi, evaluasi dampak lingkungan, dan biaya produksi untuk masing-masing skenario. Data yang dianalisis mencakup karakteristik fisik dan kimia limbah kelapa sawit, seperti nilai COD dan BOD dari POME, serta analisis ultimat, proksimat, dan komposisi kimia dari TKKS, cangkang, dan serat untuk menentukan kelayakan konversinya menjadi bioenergi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap produk bioenergi memiliki karakteristik yang berbeda dalam hal emisi yang dihasilkan dan biaya produksi. Berdasarkan analisis, urutan produk bioenergi yang paling rendah menghasilkan emisi sekaligus memiliki biaya produksi yang lebih rendah adalah sebagai berikut. Pupuk organik, yang memiliki dampak lingkungan paling rendah karena berbasis

siklus alami dan dapat menggantikan pupuk sintetis yang berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca, dengan biaya produksi yang relatif murah. Biochar, yang tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi alternatif tetapi juga memiliki kemampuan untuk menyerap karbon di tanah, membantu meningkatkan kesuburan tanah, dan memiliki biaya produksi yang masih terjangkau, terutama dengan teknologi pirolisis skala kecil. Biogas, yang dapat mengurangi emisi metana dari POME dan dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan untuk menggantikan bahan bakar fosil, meskipun memerlukan investasi awal yang cukup besar untuk pembangunan infrastruktur digester anaerobik. Biodiesel, yang memiliki potensi besar sebagai bahan bakar alternatif untuk sektor transportasi dan industri, namun memerlukan proses pemurnian minyak residu yang lebih kompleks serta biaya produksi yang lebih tinggi dibandingkan opsi lainnya.

Dari sisi lingkungan, reduksi pupuk sintetis dengan pupuk organik dapat menurunkan emisi GWP sebesar 74,60 kg CO<sub>2</sub> eq/ton CPO; AP 0,11 kg SO<sub>2</sub> eq/ton CPO; EP 2,08 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq/ton CPO. Pada reduksi pupuk organik dengan biochar dapat mengurangi emisi GWP sebesar 76,40 kg CO<sub>2</sub> eq/ton CPO; AP 0,13 kg SO<sub>2</sub> eq/ton CPO; dan EP 2,08 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq/ton CPO. Pada pemanfaatan POME menjadi biogas dapat menurunkan emisi GWP sebesar 73,75 kg CO<sub>2</sub> eq/ton CPO; AP 0,20 kg SO<sub>2</sub> eq/ton CPO; EP 1,97 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq/ton CPO. Pada pemanfaatan POME menjadi biodiesel dapat menurunkan emisi GWP sebesar 44,29 kg CO<sub>2</sub> eq/ton CPO; AP 0,21 kg SO<sub>2</sub> eq/ton CPO; EP 0,32 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq/ton CPO. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konversi limbah kelapa sawit, seperti POME menjadi biogas dan biodiesel serta TKKS menjadi biochar dan pupuk organik, memiliki potensi ekonomi yang signifikan. Pemanfaatan ini dapat mengurangi biaya pembelian pupuk untuk budidaya kelapa sawit, mengurangi biaya pembelian bahan bakar diesel, dan biaya listrik. Hasil LCC menunjukkan nilai biaya produksi pupuk organik adalah Rp. 339/ton CPO, biaya produksi biochar adalah Rp. 1.131/ton CPO, biaya produksi energi listrik dari biogas adalah Rp. 6.440/ton CPO, dan biaya produksi biodiesel adalah Rp. 6.784. Dengan demikian, pemanfaatan limbah kelapa sawit sebagai bioenergi memiliki potensi besar untuk meningkatkan keberlanjutan industri kelapa sawit dan mendukung ekonomi sirkular.

Saran untuk penelitian lanjutan yaitu perlu lingkup penelitian yang lebih luas untuk jenis limbah yang akan dianalisis sumber-sumber energinya. Selain itu, perlu dorongan dari pemangku kepentingan dalam menetapkan standar keberlanjutan produk-produk sumber energi berbasis limbah kelapa sawit. Selanjutnya, dapat dirumuskan agroindustri CPO yang mandiri energi, dengan sistem tertutup (*close-loop system*) dan konsep ekonomi sirkular (*circular economy*).

Kata kunci: analisis keberlanjutan, dampak lingkungan, dampak ekonomi, limbah kelapa sawit

## SUMMARY

FARADILLAH RAYNITA YUSUF. Analysis of the Potential and Sustainability of Energy Sources Based on Palm Oil Waste with a Life Cycle Sustainability Assessment Approach. Supervised by Suprihatin and Nastiti Siswi Indrasti.

The palm oil industry is one of the major sectors in the Indonesian economy, but it is also a significant contributor to environmental impacts. The crude palm oil (CPO) production process generates various wastes, both solid and liquid, which if not managed properly can cause environmental pollution and increase greenhouse gas emissions. The main wastes from this industry include oil palm empty fruit bunches (EFB), shells, fibers, and liquid waste or palm oil mill effluent (POME). EFB and other solid wastes are often simply piled up or burned, which can increase carbon emissions, while POME, which has high chemical oxygen demand (COD) and biological oxygen demand (BOD) content, risks polluting water sources if disposed of without adequate treatment. However, with proper utilization, these wastes can be converted into various bioenergy products, such as organic fertilizer, biochar, biogas, and biodiesel, which not only reduce environmental impacts but also provide added value to the palm oil industry.

In this study, the life cycle sustainability assessment (LCSA) approach is used to analyze the potential utilization of palm oil waste as a renewable energy source holistically. LCSA integrates three main analytical methods: life cycle assessment (LCA) to measure the environmental impacts of each waste utilization pathway, life cycle costing (LCC) to assess the production costs and economics of the applied technology, and social life cycle assessment (S-LCA) to identify the social impacts resulting from the palm oil waste-based bioenergy system. With this approach, the research can provide a more comprehensive understanding of the best options for utilizing palm oil industry waste in the most environmentally, economically and socially sustainable manner. In addition, LCSA also helps in determining improvement scenarios to increase efficiency and reduce negative impacts of each bioenergy conversion pathway.

This study was conducted with the aim of identifying potential improvements in the utilization of palm oil waste into bioenergy by considering the environmental and economic impacts of various utilization scenarios. The study was conducted in 3 palm oil industries in Indonesia, focusing on waste characterization, bioenergy conversion analysis, environmental impact evaluation, and production costs for each scenario. The data analyzed included the physical and chemical characteristics of palm oil waste, such as COD and BOD values of POME, as well as the ultimate analysis, proximate, and chemical composition of EFB, shell, and fiber to determine the feasibility of their conversion to bioenergy.

The results show that each bioenergy product has different characteristics in terms of emissions produced and production costs. Based on the analysis, the order of bioenergy products that produce the lowest emissions while having lower production costs is as follows. Organic fertilizer, which has the lowest environmental impact because it is based on natural cycles and can replace synthetic fertilizers that contribute to greenhouse gas emissions, with relatively low production costs. Biochar, which not only serves as an alternative energy source but also can sequester carbon in the soil, helps improve soil fertility, and

has an affordable production cost, especially with small-scale pyrolysis technology. Biogas, which can reduce methane emissions from POME and be utilized as a renewable energy source to replace fossil fuels, although it requires considerable initial investment for the construction of anaerobic digester infrastructure. Biodiesel, which has great potential as an alternative fuel for the transportation and industrial sectors but requires a more complex residual oil refining process and higher production costs than other options.

In terms of the environment, the reduction of synthetic fertilizer with organic fertilizer can reduce GWP emissions by 74.60 kg CO<sub>2</sub> eq/ton CPO; AP 0.11 kg SO<sub>2</sub> eq/ton CPO; EP 2.08 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq/ton CPO. On the reduction of organic fertilizer with biochar can reduce GWP emissions by 76.40 kg CO<sub>2</sub> eq/ton CPO; AP 0.13 kg SO<sub>2</sub> eq/ton CPO; and EP 2.08 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq/ton CPO. The utilization of POME into biogas can reduce GWP emissions by 73.75 kg CO<sub>2</sub> eq/ton CPO; AP 0.20 kg SO<sub>2</sub> eq/ton CPO; EP 1.97 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq/ton CPO. The utilization of POME into biodiesel can reduce GWP emissions by 44.29 kg CO<sub>2</sub> eq/ton CPO; AP 0.21 kg SO<sub>2</sub> eq/ton CPO; EP 0.32 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq/ton CPO. The results show that the conversion of palm oil waste, such as POME into biogas and biodiesel and EFB into biochar and organic fertilizer, has significant economic potential. This utilization can reduce the cost of purchasing fertilizers for oil palm cultivation, reduce the cost of purchasing diesel fuel, and the cost of electricity. LCC results show that the production cost of organic fertilizer is Rp. 339/ton CPO, the production cost of biochar is Rp. 1,131/ton CPO, the production cost of electrical energy from biogas is Rp. 6,440/ton CPO, and the production cost of biodiesel is Rp. 6,784. Thus, the utilization of palm oil waste as bioenergy has great potential to improve the sustainability of the palm oil industry and support the circular economy.

Suggestions for further research include the need for a wider scope of research for the types of waste to be analyzed for energy sources. In addition, it needs encouragement from stakeholders in setting sustainability standards for palm oil waste-based energy source products. Furthermore, an energy independent CPO agro-industry can be formulated, with a closed-loop system and circular economy concept.

**Keywords:** economic impact, environmental impact, palm oil waste, sustainability analysis



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 2025  
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.*



## @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.

**ANALISIS POTENSI DAN KEBERLANJUTAN  
SUMBER-SUMBER ENERGI BERBASIS LIMBAH  
KELAPA SAWIT DENGAN PENDEKATAN  
*LIFE CYCLE SUSTAINABILITY ASSESSMENT***

**FARADILLAH RAYNITA YUSUF**

Tesis

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

**TEKNIK INDUSTRI PERTANIAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI PERTANIAN  
INSTITUT PERTANIAN BOGOR  
BOGOR  
2025**



*@Hak cipta milik IPB University*

Penguji pada Ujian Tesis:  
Dr. Ir. Sapta Rahardja, DEA

- 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 Tesis : Analisis Potensi dan Keberlanjutan Sumber-Sumber Energi  
Berbasis Limbah Kelapa Sawit dengan Pendekatan *Life Cycle  
Sustainability Assessment*

Nama : Faradillah Raynita Yusuf

NIM : F3501231025

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr-Ing. Ir. Suprihatin, IPU

Pembimbing 2:

Prof. Dr. Ir. Nastiti Siswi Indrasti, IPU, ASEAN-Eng



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

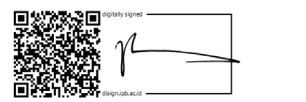
Prof. Dr. Ir. Illah Sailah, M.S

NIP 195805211982112001

Dekan Fakultas Teknologi Pertanian:

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

NIP 196105021986031002



Tanggal Ujian:  
21 Maret 2025

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 subhanahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Juni 2024 sampai bulan Desember 2024 ini ialah keberlanjutan pada industri kelapa sawit, dengan judul “Analisis Potensi dan Keberlanjutan Sumber-Sumber Energi Berbasis Limbah Kelapa Sawit dengan Pendekatan *Life Cycle Sustainability Assessment*”.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing Prof. Dr.-Ing. Ir. Suprihatin, IPU dan Prof. Dr. Ir. Nastiti Siswi Indrasti, IPU, ASEAN-Eng yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Dr. Ir. Sapta Raharja, DEA sebagai penguji pada ujian tesis atas segala masukan yang membangun. Terima kasih kepada Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi yang telah memberikan beasiswa Pendidikan Magister menuju Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU) batch VII. Di samping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada Pabrik Kelapa Sawit 1, Pabrik Kelapa Sawit 2, dan Pabrik Kelapa Sawit 3 yang telah membantu selama pengumpulan data.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada seluruh dosen dan tenaga kependidikan Departemen TIP IPB. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada rekan-rekan seperjuangan S2 TIP 2023 dan karyasiswa PMDSU Batch VII IPB. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada ayah Ronny Yusuf, ibu Yayuk Sri Rahayu, adik Nabillah Raissa Yusuf, serta seluruh keluarga yang selalu memberikan dukungan dan doa. Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, April 2025

Faradillah Raynita Yusuf



## @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 ISI                                                                 | xiii |
| DAFTAR TABEL                                                               | xiv  |
| DAFTAR GAMBAR                                                              | xv   |
| I PENDAHULUAN                                                              | 1    |
| 1.1 Latar Belakang                                                         | 1    |
| 1.2 Rumusan Masalah                                                        | 2    |
| 1.3 Tujuan Penelitian                                                      | 3    |
| 1.4 Manfaat Penelitian                                                     | 3    |
| 1.5 Ruang Lingkup Penelitian                                               | 3    |
| II TINJAUAN PUSTAKA                                                        | 4    |
| 2.1 Industri Kelapa Sawit di Indonesia                                     | 4    |
| 2.2 Keberlanjutan ( <i>Sustainability</i> )                                | 5    |
| 2.3 <i>Life Cycle Sustainability Assessment</i>                            | 7    |
| 2.4 Penelitian Terdahulu                                                   | 7    |
| III METODE                                                                 | 9    |
| 3.1 Kerangka Pemikiran Penelitian                                          | 9    |
| 3.2 Waktu dan Tempat Penelitian                                            | 13   |
| 3.3 Metode Pengumpulan Data                                                | 13   |
| 3.4 Analisis Potensi Limbah Industri Kelapa Sawit Menjadi Bioenergi        | 13   |
| 3.5 Analisis Dampak Lingkungan dengan <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA)   | 13   |
| 3.6 Analisis Dampak Ekonomi dengan <i>Life Cycle Costing</i>               | 15   |
| 3.7 Analisis Dampak Sosial dengan <i>Social Life Cycle Assessment</i>      | 15   |
| IV HASIL DAN PEMBAHASAN                                                    | 17   |
| 4.1 Profil Pabrik Kelapa Sawit yang Diamati                                | 17   |
| 4.2 Potensi Limbah Kelapa Sawit Menjadi Bioenergi                          | 17   |
| 4.3 Analisis Dampak Lingkungan pada Pabrik Kelapa Sawit                    | 20   |
| 4.4 Analisis Dampak Ekonomi pada Pabrik Kelapa Sawit                       | 27   |
| 4.5 Analisis Dampak Sosial pada Pabrik Kelapa Sawit                        | 36   |
| 4.6 Identifikasi Skenario Perbaikan Keberlanjutan pada Pabrik Kelapa Sawit | 41   |
| 4.7 Manfaat Penelitian                                                     | 51   |
| 4.8 Penelitian Masa Depan                                                  | 52   |
| V SIMPULAN DAN SARAN                                                       | 53   |
| 5.1 Simpulan                                                               | 53   |
| 5.2 Saran                                                                  | 54   |
| DAFTAR PUSTAKA                                                             | 55   |
| LAMPIRAN                                                                   | 58   |
| RIWAYAT HIDUP                                                              | 65   |



## DAFTAR TABEL

|    |                                                                                |    |
|----|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | Matriks rancangan penelitian                                                   | 11 |
| 2  | Profil PKS yang Diamati                                                        | 17 |
| 3  | Karakteristik <i>palm oil mill effluent</i> (POME)                             | 19 |
| 4  | Analisis ultimat pada TKKS, cangkang, dan serat kelapa sawit                   | 19 |
| 5  | Analisis proksimat pada TKKS, cangkang, dan serat kelapa sawit                 | 20 |
| 6  | Komposisi kimia pada TKKS, cangkang, dan serat kelapa sawit                    | 20 |
| 7  | Data inventori budidaya kelapa sawit                                           | 22 |
| 8  | Data inventori transportasi TBS dari kebun ke pabrik                           | 23 |
| 9  | Data inventori proses produksi CPO                                             | 23 |
| 10 | Dampak emisi yang dihasilkan pada PKS 1, PKS 2, dan PKS 3                      | 25 |
| 11 | Perhitungan nilai penyusutan dari alat dan bangunan pada produksi CPO di PKS 1 | 29 |
| 12 | Inventori LCC pada budidaya kelapa sawit di PKS 1                              | 30 |
| 13 | Inventori LCC pada transportasi TBS ke pabrik di PKS 1                         | 30 |
| 14 | Inventori LCC pada produksi CPO di PKS 1                                       | 30 |
| 15 | Perhitungan nilai penyusutan dari alat dan bangunan pada produksi CPO di PKS 2 | 31 |
| 16 | Inventori LCC pada budidaya kelapa sawit di PKS 2                              | 32 |
| 17 | Inventori LCC pada biaya transportasi TBS ke pabrik di PKS 2                   | 32 |
| 18 | Inventori LCC pada Biaya Produksi CPO di PKS 2                                 | 32 |
| 19 | Perhitungan nilai penyusutan dari alat dan bangunan pada produksi CPO di PKS 3 | 33 |
| 20 | Inventori LCC pada budidaya kelapa sawit di PKS 3                              | 34 |
| 21 | Inventori LCC pada biaya transportasi TBS ke pabrik di PKS 3                   | 34 |
| 22 | Inventori LCC pada biaya produksi CPO di PKS 3                                 | 34 |
| 23 | Skala referensi penilaian tingkat keberlanjutan sosial                         | 37 |
| 24 | Analisis dampak sosial pabrik kelapa sawit 3                                   | 40 |
| 25 | Identifikasi <i>Hotspot</i> dan Peluang Perbaikan                              | 43 |
| 26 | Hasil reduksi pupuk sintetis dengan pupuk organik                              | 47 |
| 27 | Hasil reduksi pupuk sintetis dengan biochar                                    | 47 |
| 28 | Estimasi potensi energi biogas                                                 | 47 |
| 29 | Estimasi potensi energi biodiesel                                              | 48 |
| 30 | Biaya operasional dan biaya investasi pada skenario perbaikan                  | 49 |

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 GAMBAR

|    |                                                                                               |    |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | Pohon industri kelapa sawit                                                                   | 6  |
| 2  | Kerangka pemikiran penelitian                                                                 | 10 |
| 3  | Kelapa sawit dan hasil sampingnya (Kaniapan <i>et al.</i> 2021)                               | 18 |
| 4  | Batasan sistem LCA produksi CPO                                                               | 21 |
| 5  | Kategori dampak emisi yang paling berpengaruh di PKS 1, PKS 2, dan PKS 3                      | 25 |
| 6  | Persentase kontribusi dampak emisi di setiap sub-sistem pada a) PKS 1, b) PKS 2, dan c) PKS 3 | 26 |
| 7  | LCC pada masing-masing komponen biaya                                                         | 35 |
| 8  | Hasil analisis dampak sosial dari stakeholder a) pekerja dan b) masyarakat sekitar PKS 3      | 41 |
| 9  | Hasil perbandingan dampak lingkungan antar skenario                                           | 48 |
| 10 | Hasil perbandingan dampak ekonomi antar skenario                                              | 50 |
| 11 | Hasil perbandingan dampak sosial antar skenario                                               | 51 |

## DAFTAR LAMPIRAN

|   |                                                                              |    |
|---|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Perhitungan Konversi Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Menjadi Pupuk Organik | 58 |
| 2 | Perhitungan Konversi Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Menjadi Biochar       | 59 |
| 3 | Penentuan Konsentrasi Hara N, P, dan K dalam Pupuk Organik dan Biochar       | 60 |