



Contents lists available at [Journal IICET](#)  
**JPPI (Jurnal Penelitian Pendidikan Indonesia)**  
ISSN: 2502-8103 (Print) ISSN: [2477-8524](#) (Electronic)  
Journal homepage: <https://jurnal.iicet.org/index.php/jppi>



## Indikator sirkularitas di dalam tata kelola limbah pabrik kelapa sawit studi kasus: limbah cair (pome) pabrik kelapa sawit

Ani Yunaningsih, Yudi Satriadi<sup>\*)</sup>, Amras Mauluddin  
Sekolah Tinggi Bahasa Asing YAPARI, Bandung, Indonesia

### Info Artikel

#### Article history:

Received Jan 17<sup>th</sup>, 2024  
Revised May 05<sup>th</sup>, 2024  
Accepted Dec 31<sup>th</sup>, 2024

#### Keywords:

Ekonomi sirkular  
Material circularity indicator  
Pabrik kelapa sawit  
Pome

### ABSTRACT

This research was motivated by the problem of liquid waste from palm oil mills. The research aims to find out and understand the current form of palm oil mill waste management, to find out the factors that support palm oil mill waste governance in realizing a circular economy. Determining circularity indicators is one method to see the performance of palm oil liquid waste processing (POME) management and is a benchmark for the level of circularity of palm oil mill governance. The research approach uses the MCI circularity indicator developed by the Ellen MacArthur Foundation in assessing circularity indicators for various POME waste management scenarios in palm oil mills. From various POME processing governance scenarios, namely: 1) Based on field practices in palm oil mills, 2) Based on government regulations regarding POME processing in palm oil mills, 3) Processing POME with biogas technology with an open pond system, 4) Processing POME with biogas technology with a CSTR system, and 5) Processing POME into fertilizer. Based on the assessment results of various scenarios, the MCI circularity values for PKS A, B, and C under existing conditions are as follows: 0.6009 for the current system, 0.5500 for compliance with regulations, 0.5781 for biogas processing with closed ponds, 0.6143 for biogas processing with CSTR, and 0.7065 for fertilizer production. The highest circularity value of 0.7065 is achieved through the scenario of processing POME into fertilizer. This shows that liquid waste management by palm oil mills in Indonesia is still dominated by traditional systems in the form of open ponds.



© 2024 The Authors. Published by IICET.  
This is an open-access article under the CC BY-NC-SA license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>)

### Corresponding Author:

Yudi Satriadi,  
Sekolah Tinggi Bahasa Asing YAPARI  
Email: [yudisatriadi@stba.ac.id](mailto:yudisatriadi@stba.ac.id)

## Pendahuluan

Di dalam kerangka pembangunan yang berkelanjutan, isu terkait dengan ekonomi sirkular merupakan salah satu hal yang mengemuka. Pendekatan manajemen yang selama ini mendekati sebuah proses produksi dengan pendekatan yang linier telah mulai berubah ke arah pendekatan yang sirkular. Berbagai alat ukur mulai dikembangkan untuk mengukur sirkularitas dari sebuah proses produksi, hal ini diperlukan pihak manajemen atau pengambil keputusan di dalam melihat perkembangan antar waktu dari sirkularitas proses produksi yang dilakukan. Salah satu bidang industri yang menjadi titik perhatian dari penelitian ini adalah industri kelapa sawit, yang merupakan salah satu pilar penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi di Indonesia.

Salah satu pendekatan yang dilakukan adalah mendorong proses hilirisasi pada sektor kelapa sawit, yang melibatkan peningkatan pengolahan produk sawit hingga tahap lanjutan. Menurut hasil penelitian yang dilakukan oleh Bambang Irawan dan Nining I. Soesilo (2021: 29-43), implementasi kebijakan hilirisasi dalam industri kelapa sawit memiliki dampak yang positif terhadap permintaan Crude Palm Oil (CPO) di sektor hilir. Temuan ini menunjukkan adanya tren peningkatan dalam produksi dan konsumsi CPO domestik. Hasil ini mengindikasikan keberhasilan program hilirisasi yang diinisiasi oleh pemerintah dalam merangsang konsumsi dan produksi di sektor pengolahan CPO, meskipun sempat terjadi perlambatan pada periode 2014-2015.

Namun demikian, industri kelapa sawit juga dihadapkan pada berbagai isu lingkungan, termasuk masalah deforestasi dan akumulasi limbah. Isu deforestasi, khususnya, telah mendapat perhatian serius dari negara-negara Eropa, yang mulai mengurangi minat terhadap produk kelapa sawit meskipun mereka merupakan salah satu konsumen utama CPO. Meskipun demikian, langkah-langkah penghapusan bertahap terhadap minyak sawit dapat berdampak negatif mengingat manfaat yang dapat diambil darinya, sebagaimana telah diuraikan sebelumnya. Oleh karena itu, untuk mengurangi dampak deforestasi, inisiatif seperti Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO) telah dibentuk sebagai entitas global yang mendorong produksi minyak sawit berkelanjutan melalui pemberian sertifikasi rantai pasok. Di tingkat nasional, Indonesia juga telah meluncurkan kebijakan untuk membatasi ekspansi perkebunan guna mengatasi isu deforestasi.

Di sisi lain, perlu diakui bahwa industri kelapa sawit memiliki potensi untuk menyebabkan pencemaran lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Setiap ton CPO dapat berkontribusi terhadap produksi 9 ton biomassa dan mempengaruhi tingkat limbah pertanian secara signifikan. Biomassa ini melibatkan berbagai komponen padatan, mulai dari pelepah dan batang kelapa sawit hingga tandan buah kosong, serat, cangkang inti sawit, dan selain itu terdapat juga limbah cair, yaitu POME (Palm Oil Mill Effluent) yang dihasilkan selama proses produksi CPO. Meski demikian, perlu ditegaskan bahwa masalah akumulasi limbah dapat diartikan sebagai peluang, bukan semata-mata sebagai ancaman, terutama jika ditangani dengan cara yang tepat. Sejumlah teknologi konversi telah dikembangkan dan diterapkan untuk memanfaatkan limbah kelapa sawit, termasuk dalam produksi biofuel dan biokimia. Secara paralel, industri kelapa sawit juga dapat menjadi pusat permintaan untuk meningkatkan pemanfaatan limbahnya sendiri.

Pada umumnya, sektor industri kelapa sawit mengandalkan sejumlah sumber daya input yang esensial, termasuk namun tidak terbatas pada pupuk, uap, bahan bakar, serta energi listrik. Dalam rangka menghasilkan sumber daya ini, pemanfaatan biomassa melalui pendekatan teknologi konversi biomassa yang relevan atau yang lebih dikenal sebagai biorefineri, menjadi suatu keharusan. Melalui pendekatan ini, kecenderungan ekonomi berbasis sirkular atau kerangka kerja sirkularitas muncul sebagai potensi pengembangan di lingkungan industri kelapa sawit. Kerangka ini berusaha mengaitkan limbah yang dihasilkan oleh industri dengan potensi sumber daya input, menghasilkan sebuah sistem yang lebih terpadu. Dalam perspektif fisik, konseptualisasi ekonomi sirkular berkelanjutan dapat diartikan sebagai strategi untuk meminimalisir aliran keluar material dari sistem, dimana dalam konteks ini, biomassa berfungsi sebagai material tersebut dan industri kelapa sawit sebagai sistem yang melibatkannya. Namun, realitas industri kelapa sawit di Indonesia saat ini lebih cenderung mengadopsi pendekatan ekonomi linier yang mengikuti pola 'membuat-menggunakan-buang'. Pendekatan konvensional seperti ini dapat dianggap kurang efisiensi karena tidak sepenuhnya memanfaatkan potensi keuntungan ekonomi, menyiratkan bahwa sejumlah sumber daya dilupakan sebagai dampak dari model 'membuat-menggunakan-buang' tersebut. Dalam hal ini, tuntutan akan pemanfaatan efektif terhadap biomassa muncul, di mana gagasan tentang sirkularitas dapat diperkenalkan ke ranah industri kelapa sawit, membentuk suatu sistem regeneratif yang berdiri mandiri, serta menghasilkan kelanjutan yang lebih berkesinambungan.

Berdasarkan penelitian Kachapoch et al. (2021) tentang pengukuran minyak kelapa sawit mentah, nilai MCI yang diperoleh adalah 0,5438 dengan tingkat ekstraksi minyak sebesar 18%. Setelah dilakukan modifikasi, nilai MCI meningkat menjadi 0,6430, menunjukkan adanya peningkatan sirkularitas dari tingkat ekstraksi awal sebesar 18%. Penelitian oleh Yeo J. et al. (2020) mengenai sintesis ekonomi sirkular berkelanjutan pada industri kelapa sawit menggunakan metode P-graph menunjukkan potensi pengurangan impor uap sebesar 39,292% dan impor listrik sebesar 13,469%. Namun, pendekatan ini menghasilkan penurunan laba kotor sebesar 0,642%. Penelitian yang dilakukan oleh Hasanudin (2017) mengenai pengolahan dan pemanfaatan limbah pabrik kelapa sawit untuk keberlanjutan, Pemanfaatan POME yang telah diolah sebagai pupuk cair melalui sistem aplikasi di lahan telah meningkatkan produksi TBS sebesar 13%. Pabrik kelapa sawit dengan kapasitas 45 ton TBS per jam berpotensi menghasilkan listrik sekitar 0,95-1,52 MW melalui implementasi penangkapan metana dari kolam terbuka. Penelitian lain yang dilakukan oleh Irwansyah. et al (2018) mengenai pemanfaatan POME sebagai pembangkit listrik tenaga biogas menggunakan CSTR (Continuous Stirred Tank Reaktor) didapat biogas sebesar 1.208.967 m<sup>3</sup> dengan potensi energi listrik sebesar 4.594,075 MWh.

Hasil penelitian lain menurut Susilawati (2015), rata-rata jumlah limbah padat yang dihasilkan pabrik yaitu janjang kosong (JKK) sekitar 18% sampai 21% dari TBS yang diolah, serabut (fiber) sekitar 11% sampai 13 % dari TBS yang diolah, cangkang sekitar 5 % dari TBS yang diolah, dan selebihnya adalah POME sekitar 60 % dari TBS yang diolah. Limbah padat yang terdiri dari cangkang dan serat kelapa sawit diimplementasikan sebagai bahan bakar dalam boiler dalam proses pengolahan Tandan Buah Segar (TBS) di fasilitas Pabrik Kelapa Sawit (PKS). Pada saat yang sama, residu janjang kosong digunakan sebagai "pupuk organik" dengan diterapkan pada lahan pertanian melalui pendekatan aplikasi yang sesuai dengan rekomendasi yang ditetapkan oleh Departemen Riset. Metode penerapan residu janjang kosong melalui teknik mulching diterapkan di antara empat tanaman pokok untuk setiap titik pada tanaman menghasilkan (TM).

Guna menjadikan limbah tersebut sebagai sumber energi, diperlukan "teknologi konversi" yang mampu mengubah biomassa menjadi bentuk energi yang berguna (Parindui & Parinduri, 2020). Penggunaan biomassa untuk menghasilkan panas dengan cara yang "sederhana" di lingkungan PKS melibatkan pembakaran langsung serat atau cangkang sebagai biomassa, yang kemudian menghasilkan panas. Pembangunan berkelanjutan diartikan sebagai strategi untuk memastikan ketersediaan sumber daya yang berkelanjutan bagi generasi yang akan datang. Salah satu paradigma ekonomi yang diusulkan untuk menggantikan pendekatan ekonomi linier adalah model ekonomi sirkular. Dalam model ini, barang yang telah mengalami konsumsi dapat dikelola kembali melalui prinsip Reduce, Reuse, Recycle, Replace, Repair (5R). Melalui proses ini, limbah diolah kembali sehingga mengurangi dampak negatif dari limbah berbahaya terhadap lingkungan, dan pada gilirannya dapat diberdayakan kembali sebagai produk baru atau bahan baku untuk produk lain.

Konsep ekonomi sirkular secara hakiki berdiri sebagai kontraposisif terhadap paradigma produksi ekonomi yang mengutamakan model linear. Dengan demikian, terdapat aspek-aspek tertentu yang mengalami penekanan akibat dari pendekatan produksi yang bersifat berkelanjutan. Meskipun proses transisi menuju ekonomi sirkular tidak diperoleh secara instan, hasil akhir yang akan dicapai berupa kesejahteraan yang merentangkan manfaat kepada manusia, lingkungan, dan aspek-aspek ekonomi secara bersamaan. Menurut Kirchherr, et al. (2017:221) dalam penelitian mereka, konsep ekonomi sirkular merujuk pada suatu kerangka ekonomi yang mengintegrasikan siklus hidup produk hingga tahap akhir, dengan prinsip-prinsip utama yang mencakup pengurangan (Reduce), penggunaan ulang (Reuse), dan perbaikan material dalam proses produksi, distribusi, dan konsumsi (Repair). Pendekatan ini dapat diimplementasikan pada berbagai tingkatan, termasuk skala mikro (perusahaan, konsumen), skala meso (kawasan ekoindustri), dan skala makro (kota, wilayah, negara), dengan tujuan utama untuk mencapai tujuan ekonomi berkelanjutan, serta mewujudkan kualitas lingkungan yang optimal, kesejahteraan ekonomi, dan keadilan sosial. Pengembangan ekonomi sirkular memerlukan transformasi dalam model bisnis dan adopsi perilaku konsumen yang bertanggung jawab. Dalam konteks Indonesia, pemerintah melalui Kementerian Perindustrian (Kemenperin) telah menetapkan lima prinsip sebagai pijakan utama, yaitu reduce melalui pengurangan pemakaian material mentah dari alam, reuse melalui optimasi penggunaan material yang dapat digunakan kembali, recycle melalui penggunaan material hasil dari proses daur ulang, recovery melalui proses perolehan kembali, repair memperbaiki material agar dapat digunakan kembali.

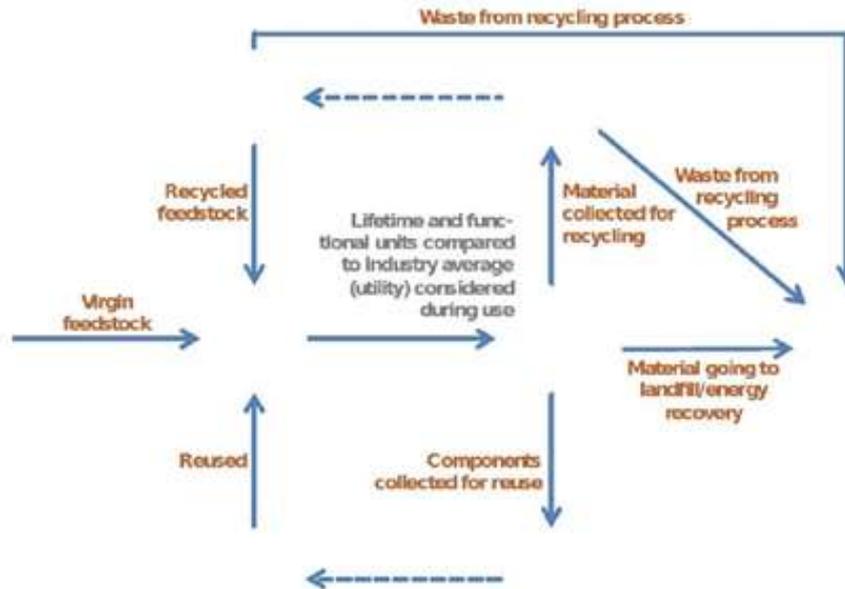
Meskipun penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Kachapochaet et al. (2021), Yeo J. et al. (2020), Hasanudin (2017), Irwansyah. et al (2018), dan Susilawati (2015) telah membahas implementasi ekonomi sirkular dalam industri kelapa sawit, penelitian-penelitian tersebut cenderung berfokus pada aspek spesifik seperti peningkatan sirkularitas dalam ekstraksi minyak kelapa sawit. Namun, penelitian-penelitian ini belum sepenuhnya mengeksplorasi integrasi konsep ekonomi sirkular pada skala yang lebih luas, termasuk penerapan prinsip reduce, reuse, recycle, recovery, dan repair secara holistik dalam berbagai tahapan siklus hidup produk di industri kelapa sawit. Selain itu, penelitian-penelitian tersebut belum secara mendalam mengevaluasi bagaimana prinsip-prinsip ekonomi sirkular ini dapat mendukung keberlanjutan ekonomi, lingkungan, dan sosial secara bersamaan. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi gap tersebut dengan mengadopsi pendekatan yang lebih komprehensif, mengintegrasikan prinsip-prinsip utama ekonomi sirkular serta mengevaluasi dampaknya terhadap keberlanjutan industri kelapa sawit di Indonesia. Dengan mempertimbangkan kebijakan dan inisiatif pemerintah Indonesia melalui Kementerian Perindustrian (Kemenperin), penelitian ini juga akan menilai efektivitas penerapan lima prinsip utama ekonomi sirkular dalam menciptakan model bisnis yang berkelanjutan dan perilaku konsumen yang bertanggung jawab.

## Metode

### Indikator Sirkularitas Material

Ellen MacArthur Foundation (2021) menghadirkan konsep "Indikator Material Sirkularitas Material" atau yang dikenal *Material Circularity Indicator (MCI)* yang bertujuan untuk melakukan evaluasi mengenai dalam sejauh apa

prinsip aliran linear telah ditekan dan pengembalian aliran restoratif telah ditingkatkan terhadap bahan-bahan komponennya. Selain itu, indikator ini juga melibatkan analisis sejauh mana intensitas dan durasi penggunaan dibandingkan dengan rata-rata produk dalam industri yang serupa. Pendekatan yang dikembangkan oleh Ellen MacArthur ini merupakan pendekatan yang biasanya dilakukan di industri manufaktur, namun tidak tertutup kemungkinan pendekatan ini dilakukan di industri proses. Struktur inti dari Indikator Sirkularitas Material tersebut pada dasarnya terbentuk melalui penggabungan tiga karakteristik utama produk, yang meliputi massa bahan mentah yang digunakan dalam pabrik, massa limbah yang dikaitkan dengan produk dan faktor utilitas yang menjelaskan panjang dan intensitas penggunaan produk.



**Gambar 1.** Model Sirkularitas Material (Ellen MacArthur Foundation, 2021)

Indikator Sirkularitas Material ini merupakan alat penilaian bagi perusahaan untuk: 1) Mengukur sirkularitas aliran material untuk produk yang dipilih. 2) Memungkinkan perusahaan untuk membangun dari produk ke portofolio, ini dapat diperluas ke pandangan tingkat perusahaan tentang sirkularitas aliran material. 3) Mendukung pengambilan keputusan terhadap pengembangan usaha. Ada beberapa pilihan pendekatan yang bisa diterapkan untuk mengukur indikator sirkularitas pada industri pengolahan kelapa sawit, diantaranya menerapkan metode: RRFSM, CTI, MCI dan pengembangan metode lainnya.

### Pendekatan MCI

MCI merupakan alat ukur indikator sirkularitas yang diusulkan oleh Ellen MacArthur Foundation (Kachapocha, Samneangnam, Poolsawad, & Chinda, 2021) yang mempertimbangkan: 1) daur ulang dan penggunaan kembali produk. 2) limbah yang dihasilkan oleh proses manufaktur. 3) kegunaan produk. 4) masa pakai rata-rata produk. 5) unit fungsional produk industri. Semua ini direpresentasikan sebagai nilai tunggal, mulai dari 0-1, di mana 1 berarti produk sirkular penuh dan 0 berarti produk linier sepenuhnya. MCI juga berfungsi sebagai alat yang bisa mengevaluasi kinerja sirkularitas tingkat produk dengan mempertimbangkan: 1) penggunaan kembali dan daur ulang dalam bahan baku, dinyatakan sebagai rasio penggunaan kembali dan daur ulang. 2) timbulan limbah oleh proses manufaktur dan utilitas produk yang dihitung dari masa pakai produk. 3) Unit fungsional dibandingkan dengan produk industri yang sama.

Perhitungan MCI mengacu pada dokumen metodologi Material Circularity Indicator dari Ellen MacArthur Foundation (Ellen MacArthur Foundation, 2019). Untuk menghitung MCI, bahan baku murni ( $V$ ) terlebih dahulu dihitung. Bahan baku murni yang digunakan dalam produksi diberikan oleh:

$$V = M(1 - F_R - F_U - F_S) \quad (1.1)$$

Dimana  $M$  adalah massa produk akhir,  $F_R$  adalah fraksi bahan baku daur ulang,  $F_U$  adalah fraksi bahan baku yang digunakan kembali, dan  $F_S$  adalah fraksi bahan baku biologis dari produksi berkelanjutan *Unrecoverable waste* ( $W_0$ ) yaitu sampah yang dikirim ke *landfill* atau *energy recovery* dihitung sebagai:

$$W_0 = M(1 - C_R - C_U - C_C - C_E) \quad (1.2)$$

Dimana  $C_R$  adalah fraksi produk setelah digunakan dikumpulkan untuk proses daur ulang,  $C_U$  adalah fraksi produk setelah digunakan dikumpulkan untuk digunakan kembali,  $C_C$  adalah fraksi produk setelah digunakan dikumpulkan untuk proses pengomposan, dan  $C_E$  adalah fraksi dari produk setelah digunakan dikumpulkan untuk pemulihan energi. Ini menghasilkan limbah dari proses daur ulang ( $W_C$ ) yang tergantung pada efisiensi proses daur ulang ( $E_C$ ).

$$W_C = M(1 - E_C)C_R \quad (1.3)$$

Ada juga limbah yang dihasilkan untuk menghasilkan bahan baku daur ulang ( $W_F$ ) yang bergantung pada efisiensi proses daur ulang yang digunakan untuk menghasilkan bahan baku daur ulang ( $E_F$ ).

$$W_F = M \frac{(1-E_F)C_R}{E_F} \quad (1.4)$$

Oleh karena itu, jumlah total *unrecoverable waste* ( $W$ ) diperoleh

$$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2} \quad (1.5)$$

Tahapan selanjutnya adalah menghitung parameter Linear Flow Index (LFI) yang menunjukkan tingkat linieritas suatu produk. Nilai dari parameter ini memiliki rentang 0 hingga 1, dimana nilai 1 mewakili linieritas penuh dan nilai 0 mewakili nonlinieritas.

$$LFI = \frac{V+W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}} \quad (1.6)$$

Parameter MCI merupakan fungsi dari LFI dan faktor utilitas atau  $F(X)$ , dimana  $F(X)$  dapat dihitung berdasarkan masa pakai produk dan unit fungsional produk.

$$X = \left(\frac{L}{L_{av}}\right)\left(\frac{U}{U_{av}}\right) \quad (1.7)$$

$$F(X) = \frac{0.9}{X} \quad (1.8)$$

$$MCI_p = 1 - LFI \cdot F(X) \quad (1.9)$$

Dimana  $L$  mewakili masa pakai rata-rata actual suatu produk,  $L_{av}$  mewakili rata-rata masa pakai produk dari industri yang sama,  $U$  adalah jumlah rata-rata aktual dari unit fungsional suatu produk, dan  $U_{av}$  adalah jumlah rata-rata unit fungsional dari produk industri yang sama. Pada penelitian Muthita Kachapoch dkk (2021), rumus perhitungan *unrecoverable waste* harus dimodifikasi agar sesuai dengan CPO. Perhitungan modifikasi formula *unrecoverable waste* mempertimbangkan produk setelah digunakan, termasuk *co-product*, *waste*, dan *oil loss* dari proses pemurnian. *Co-product* dianggap sebagai bagian dari produk setelah digunakan dikumpulkan untuk didaur ulang karena selanjutnya digunakan dalam industri sabun dan oleokimia. Kehilangan minyak dari proses pemurnian dianggap sebagai bagian dari produk setelah digunakan dikumpulkan untuk digunakan kembali. Namun demikian, MCI yang telah dimodifikasi tersebut tidak mencapai 1, meskipun laju ekstraksi minyak meningkat. Hal ini karena bahan baku murni tidak memiliki fraksi penggunaan kembali, daur ulang, dan bahan biologis yaitu massa minyak dalam TBS masih sama dengan massa CPO menurut rumus Ellen MacArthur Foundation. Meskipun MCI masih ada beberapa kelemahan yang harus dimodifikasi, studi berikutnya dapat dikembangkan untuk mengukur sirkularitas pabrik kelapa sawit di tingkat perusahaan, karena ada begitu banyak produk yang harus dipertimbangkan.

## Hasil dan Pembahasan

### Analisa Data

Kita dapat menilai sirkularitas dengan menggunakan beberapa parameter, yaitu: 1) Massa produk yang dianalisa. 2) Komposisi produk samping, limbah yang dihasilkan, dan *oil loss* dari produk yang dianalisa. 3) Masa simpan/pakai rata-rata aktual dari produk yang dianalisa dan dari produk industri yang sama. 4) Nilai rata-rata aktual dari unit fungsional produk yang dianalisa dan dari produk industri yang sama. Analisa hasil berupa dukungan dalam membangun kinerja saat ini, dapat melacak kinerja dari waktu ke waktu dan mengidentifikasi peluang untuk perbaikan, dengan menafsirkan dan memvisualisasikan hasil yang diperoleh dari perhitungan.

### Hasil Perhitungan Nilai Sirkularitas POME

Penelitian ini menghitung nilai sirkularitas dari 3 Pabrik Kelapa Sawit yang berbeda dengan menggunakan metode perhitungan MCI dan membandingkannya nilai sirkularitas yang diperoleh dari kondisi praktik terbaik

pengolahan limbah cair di pabrik kelapa sawit dan peraturan yang relevan terhadap pengolahan limbah cair kelapa sawit. Hasil dan pembahasan akan dari perhitungan tersebut akan dijelaskan lebih lanjut di dalam bab ini. Metode MCI digunakan untuk menilai tingkat sirkularitas dan mengevaluasi sejauh mana produk-produk yang terkait dengan industri kelapa sawit dapat dikategorikan sebagai proses yang mengadopsi prinsip-prinsip sirkular. Tahap awal dari analisis ini dimulai dengan pemanfaatan Tandan Buah Segar (TBS) sebagai entitas awal yang diolah. Proses pengolahan TBS ini menghasilkan sejumlah komoditas, di antaranya CPO, inti biji sawit (Palm Kernel), tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang lebih dikenal sebagai Empty Fruit Bunch (EFB), serat kelapa sawit (Palm Fiber), serta cangkang biji kelapa sawit (Palm Kernel Shell).

Dalam konteks yang lebih luas, CPO ditempatkan sebagai hasil utama yang menjadi fokus, sementara komoditas lainnya dianggap sebagai produk turunan yang tetap memiliki nilai ekonomi dan manfaat yang dapat dimanfaatkan atau diteruskan ke tahap pengolahan berikutnya guna menjadi produk baru. Selain bahan-bahan yang telah diuraikan, proses konversi TBS menjadi CPO juga menghasilkan limbah dalam bentuk cairan yang dikenal sebagai limbah cair kelapa sawit atau Palm Oil Mill Effluent (POME). Dalam kerangka analisis ini, POME juga dianggap sebagai produk karena memiliki nilai ekonomi dan manfaat yang memungkinkan untuk diolah lebih lanjut menjadi produk baru, dan oleh karena itu, nilai sirkularitasnya akan dihitung dari beberapa Pabrik Kelapa Sawit. Data kuantitas POME diperoleh dari 3 pabrik kelapa sawit di Indonesia dengan kapasitas produksi yang berbeda. Data yang digunakan untuk menghitung MCI dikumpulkan melalui pengambilan data primer melalui survei dan data sekunder melalui beberapa sumber terpercaya seperti yang terdapat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Pengumpulan data yang digunakan untuk perhitungan MCI

Data primer	Data Sekunder
Bertanya secara langsung kepada ketiga PKS	Mencari dari sumber-sumber yang terpercaya yang bisa diperoleh dari sumber referensi di bawah ini: <ul style="list-style-type: none"> <li>Laporan yang dikeluarkan oleh kementerian, seperti Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan dan Kementerian Perindustrian</li> <li>Makalah penelitian yang diterbitkan secara lokal maupun internasional</li> </ul>
Pengisian data dari kuesioner yang diberikan kepada ketiga PKS	

Informasi umum dari ketiga PKS adalah sebagai berikut: 1) PKS A memiliki Kapasitas pengolahan TBS sebesar 20 ton/jam dan beroperasi selama 24 jam/hari dan 300 hari/tahun. 2) PKS B memiliki Kapasitas pengolahan TBS sebesar 30 ton/jam dan beroperasi selama 24 jam/hari dan 330 hari/tahun. 3) PKS C memiliki Kapasitas pengolahan TBS sebesar 40 ton/jam dan beroperasi selama 24 jam/hari dan 294 hari/tahun. Perhitungan sirkularitas pada studi ini difokuskan kepada POME sebagai produk dari PKS. POME memiliki pengolahan dan pemanfaatan yang begitu luas, seperti yang tertera pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Alur pengolahan dan pemanfaatan POME

Dari hasil survei lapangan maupun kuesioner, ketiga PKS yang dianalisa menggunakan proses kolam terbuka untuk mengolah POME sehingga menjadi POME yang terolah atau *treated POME*. Produk akhir ini digunakan untuk aplikasi lahan (*land application*) di lahan perkebunan dari masing-masing PKS. Meskipun belum adanya data pasti dari pihak PKS terkait seberapa besar pengaruh penggunaan POME yang terolah

terhadap kualitas lahan dan produktivitas kebun, pada studi ini akan menggunakan data dari sumber lainnya yang dapat dipertanggungjawabkan. Data pendukung yang digunakan untuk perhitungan nilai sirkularitas dari POME adalah sebagai berikut: 1) Total padatan dari POME adalah 4-5% (Ahmad, Ismail, & Bhatia, 2003) yang akan digunakan untuk menghitung  $M_{waste}$  pada perhitungan MCI. 2) *Oil loss* dari POME yang digunakan pada studi ini adalah 1%. 3) Waktu tinggal dari POME pada sistem kolam terbuka adalah 40-60 hari (Yoochatchaval, et al., 2011). 4) Unit fungsional dari POME untuk aplikasi tanah adalah nilai produktivitas TBS, sehingga jumlah aktual rata-rata dari unit fungsional (U) yang digunakan produktivitas dengan menggunakan *treated* POME yaitu sebesar 15.360,21 kg TBS/ha, sedangkan jumlah rata-rata unit fungsional dari produk industri yang sama ( $U_{av}$ ) menggunakan produktivitas tanpa menggunakan *treated* POME yaitu sebesar 13.622,45 kg TBS/ha. (Hasanudin, Sugiharto, Haryanto, Setiadi, & Fujie, 2015). 5) Unit fungsional dari POME pada skenario pengomposan untuk menjadi pupuk adalah nilai konversi dari POME yang setara dengan pupuk UREA, sehingga jumlah aktual rata-rata dari unit fungsional (U) yang digunakan sebesar  $0,0023 \text{ kg}_{urea} / \text{kg}_{pome}$  (Chong, et al., 2017), sedangkan jumlah rata-rata unit fungsional dari produk industri yang sama ( $U_{av}$ ) sebesar  $0,0015 \text{ kg}_{urea} / \text{kg}_{pome}$  (Elfidiah, B, & Salni, 2012).

Pada perhitungan MCI di studi ini, nilai dari V akan sama dengan M dan nilai  $W_F$  adalah 0 dikarenakan produksi minyak kelapa sawit tidak terdapat proses daur ulang dan penggunaan kembali dan tidak ada kandungan hayati dari bahan baku murni, yaitu TBS. Studi ini juga menggunakan beberapa alternatif skenario dari pengolahan POME untuk membandingkan nilai sirkularitas dari beberapa jenis tata Kelola limbah cair kelapa sawit yang ada. Skenario pertama dan kedua sistem kolam tertutup yang bersifat anaerobik sehingga menghasilkan gas metana yang memiliki potensi utilisasi lebih tinggi daripada POME, seperti penghasil listrik untuk memenuhi kebutuhan energi pabrik. Pembeda dari kedua skenario ini adalah bahan yang digunakan sebagai wadah penyimpanan POME, pada skenario pertama menggunakan konsep kolam tertutup sedangkan skenario kedua menggunakan tangki berpengaduk atau continuous stirred tank reactor (CSTR). Skenario ketiga adalah pengolahan POME menjadi pupuk atau kompos dengan menggunakan proses pengomposan yang kemudian digunakan untuk keperluan pemupukkan lahan kebun. Ketiga skenario ini disebut sebagai praktik terbaik dalam mengelola POME (WIPO GREEN & Winrock International, 2021).

Peraturan maupun kebijakan dari pemerintah memiliki peranan penting dalam menunjang tata kelola POME yang sudah ada maupun pengembangannya seperti pada praktek terbaik sehingga pada studi ini perhitungan nilai sirkularitas dari peraturan juga dilakukan sebagai skenario kelima. Berikut merupakan peraturan-peraturan yang berhubungan dengan pengelolaan limbah cair, khususnya POME: 1) Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. 2) Peraturan Pemerintah Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. 3) Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Permen LHK) Nomor P.68/MenLHK/Setjen/Kum.1/8/2016 tentang Tata Cara Penyusunan Rencana Pengelolaan Limbah B3 dan Izin Lingkungan. 4) Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Permen LHK) Nomor P.20/MenLHK/Setjen/Kum.1/6/2018 tentang Baku Mutu Air Limbah. 5) Peraturan Menteri Negara LH No. 51/1995, standar pembuangan air limbah industri terhadap standar baku mutu. 6) Peraturan Menteri Negara LH No. 29/2003 tentang pembuangan POME untuk aplikasi tanah. 7) Peraturan Menteri Pertanian No. 19/2011 tentang Kelapa Sawit Berkelanjutan Indonesia (ISPO). Hasil dari perhitungan MCI untuk POME pada 3 PKS dan berbagai skenario ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 3. Grafik dari Nilai Sirkularitas dari Berbagai Skenario

**Tabel 2.** Hasil Perhitungan MCI untuk POME pada Berbagai Kondisi

Parameter	PKS A	PKS B	PKS C	Kolam Tertutup	CSTR	Pupuk	Peraturan
M	10.080	124	16.464	45.360	45.360	45.360	45.360
V	10.080	124	16.464	45.360	45.360	45.360	45.360
M <sub>Co-product</sub>	-	-	-	-	-	-	-
M <sub>Waste</sub>	403,200	4,940	658,560	1.814,400	1.814,400	1.814,400	1.814,400
M <sub>Oil loss</sub>	100,800	1,235	164,640	453,600	453,600	453,600	453,600
M*	504,000	6,175	823,200	2.268,000	2.268,000	2.268,000	2.268,000
W <sub>0</sub>	-	-	-	-	-	-	-
C <sub>R</sub>	-	-	-	-	-	-	-
C <sub>U</sub>	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
C <sub>C</sub>	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800
C <sub>E</sub>	-	-	-	-	-	-	-
W <sub>C</sub>	-	-	-	-	-	-	-
E <sub>C</sub>	-	-	-	-	-	-	-
W <sub>F</sub>	-	-	-	-	-	-	-
E <sub>F</sub>	-	-	-	-	-	-	-
W	-	-	-	-	-	-	-
L	60	60	60	40	20	20	1
L <sub>av</sub>	60	60	60	40	20	20	1
U	15.360,210	15.360,210	15.360,210	25,600	28,000	0,0023	1
U <sub>av</sub>	13.622,450	13.622,450	13.622,450	24,000	24,000	0,0015	1
X	1,128	1,128	1,128	1,067	1,167	1,533	1
F(X)	0,798	0,798	0,798	0,844	0,771	0,587	0,900
LFI	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
MCI	0,6009	0,6009	0,6009	0,5781	0,6143	0,7065	0,5500

**Tabel 3.** Nilai Sirkularitas dari Berbagai Kondisi

Nilai Sirkularitas		
Kondisi yang ada	PKS A	0,6009
	PKS B	0,6009
	PKS C	0,6009
	Peraturan	0,5500
Kondisi praktik terbaik	Biogas dengan Kolam Tertutup	0,5781
	Biogas dengan CSTR	0,6143
	Pupuk	0,7065

Gambar 3 menunjukkan nilai sirkularitas MCI (Material Circularity Indicator) untuk berbagai skenario di tiga Pabrik Kelapa Sawit (PKS) yang dianalisis. PKS A, B, dan C merepresentasikan kondisi eksisting masing-masing pabrik. Nilai MCI merupakan indikator yang mengukur tingkat efisiensi penggunaan material dalam suatu sistem, di mana semakin tinggi nilainya (mendekati 1), semakin baik tingkat sirkularitasnya. Skenario "Peraturan" mengacu pada penerapan standar regulasi pengelolaan limbah, sedangkan "Praktik Terbaik (CSTR)" dan "Praktik Terbaik (Pupuk)" mengacu pada skenario optimal dengan teknologi reaktor tertutup CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor) dan pengolahan limbah cair (POME) menjadi pupuk, yang menghasilkan nilai sirkularitas tertinggi pada 0.7065.

Dari hasil perhitungan MCI pada studi ini didapati bahwa tata kelola POME dengan proses pengomposan memiliki nilai sirkularitas yang paling tinggi. Hal ini dimungkinkan karena pupuk yang dihasilkan dari pengelolaan POME dapat meningkatkan kesuburan tanah sehingga meningkatkan produktivitas dari tandan buah segar kelapa sawit sehingga produksi CPO, sebagai produk utama, dapat meningkat. Siklus seperti ini sangat menggambarkan penerapan ekonomi sirkular dimana seluruh produk yang dihasilkan dapat dimanfaatkan kembali sehingga meningkatkan nilai ekonomi dari proses itu sendiri tanpa membuang suatu produk yang masih memiliki nilai ekonomi.

Pada nilai sirkularitas dari ketiga PKS yang dianalisa memiliki nilai yang sama besarnya, yaitu 0,6009. Hal ini terjadi dikarenakan dari hasil survei secara langsung ke lapangan ketiga PKS tersebut memanfaatkan POME yang telah diolah dengan sistem kolam terbuka untuk aplikasi tanah pada lahan perkebunan masing-masing PKS sehingga tidak ada perbedaan dari pemanfaatan dan pengelolaan POME. Nilai ini sedikit lebih tinggi

daripada praktek terbaik dengan skenario penggunaan kolam tertutup sebagai metode penangkapan metana yang memiliki nilai sebesar 0,5781. Nilai yang lebih tinggi ini dapat terjadi karena pemanfaatan POME untuk aplikasi tanah secara langsung berhubungan dengan peningkatan produktivitas bahan baku murni, sedangkan pemanfaatan POME menjadi biogas memiliki dampak kepada parameter pendukung yaitu substitusi dan pemenuhan energi dari pabrik itu sendiri.

Jika dibandingkan dengan konsep yang sama, skenario kedua yaitu penggunaan CSTR dalam pengelolaan POME menjadi biogas akan memiliki nilai sirkularitas yang lebih tinggi daripada skenario pertama yang menggunakan kolam tertutup, yaitu sebesar 0,6143. Pada dasarnya biogas yang dihasilkan dari CSTR akan memiliki kualitas yang lebih baik, seperti jumlah biogas yang dihasilkan dan komposisinya, dibandingkan dengan kolam tertutup. Jumlah biogas yang lebih banyak dan dengan kualitas yang lebih baik dapat menghasilkan jumlah energi yang lebih besar sehingga dapat meningkatkan kualitas maupun kuantitas produksi. Begitu juga dengan skenario ketiga yang itu tata kelola POME dengan sistem pengomposan yang memiliki nilai yang lebih tinggi daripada pemanfaatan POME untuk aplikasi lahan, yaitu 0,7065 meskipun sama-sama memiliki manfaat terhadap kesuburan tanah dan peningkatan produktivitas bahan baku murni. Hal ini dapat terjadi karena untuk pengomposan akan menggunakan proses tambahan untuk meningkatkan nutrisi dan kualitas dari pupuk yang dihasilkan, sehingga dampaknya akan lebih besar daripada pemanfaatan POME untuk aplikasi tanah yang tidak menggunakan proses lebih lanjut.

Untuk skenario keempat, dimana tata kelola POME yang mengikuti arahan dari peraturan yang ada, akan menghasilkan nilai sirkularitas yang paling kecil, yaitu 0,55. Nilai yang diperoleh ini disebabkan oleh tidak adanya peraturan yang spesifik mengatur tata kelola POME untuk pemanfaatan dan pengelolaan lebih lanjut dari POME dan hanya terdapat peraturan mengenai baku mutu air limbah cair yang dibuang ke tanah dan sumber air lainnya. Oleh karena itu tata kelola POME berdasarkan peraturan yang ada di Indonesia dapat digambarkan dengan tata kelola POME yang konvensional, yaitu menggunakan sistem kolam terbuka dan tanpa pemanfaatan POME sehingga POME yang telah diolah akan dibuang ke sumber air secara langsung.

Penelitian yang dilakukan oleh Benjarano P. et al. (2022) mengenai sirkularitas yang didasarkan pada pemulihan limbah dan produk sampingan dari proses transformasi minyak kelapa sawit, memungkinkan visualisasi skenario komparatif berdasarkan penggunaan saat ini dan potensi penggunaan (dapat disesuaikan dengan proyeksi) dalam dua indikator kuantitatif. Meskipun indikator-indikator tersebut mengukur variabel yang berbeda, indikator tersebut memfasilitasi interpretasi simbiosis dari praktik-praktik pengelolaan lingkungan yang didasarkan pada pembangunan berkelanjutan. Demikian juga, keduanya menggambarkan kelayakan untuk menghasilkan indikator ekonomi sirkular yang berbeda yang mengukur proses penggabungan, penghapusan dan/atau pencegahan limbah.

Dari analisis tiga Pabrik Kelapa Sawit (PKS) dapat disimpulkan bahwa praktik pengelolaan yang biasa diterapkan oleh PKS di Indonesia masih bersifat tradisional yaitu penggunaan sistem kolam terbuka untuk mengelola limbah cair. Hal ini mencerminkan situasi umum industri kelapa sawit Indonesia. Temuan ini konsisten dengan penelitian yang dilakukan oleh Rajani et al. pada tahun 2019, menunjukkan bahwa persentase pabrik yang berhasil menerapkan teknologi limbah cair kelapa sawit (POME) menjadi biogas masih kurang dari 10% dari sekitar 640 pabrik yang beroperasi di Indonesia. Namun, keterbatasan dari riset ini terletak pada fokusnya yang hanya mencakup analisis praktik pengelolaan limbah cair secara umum, tanpa mengevaluasi perbedaan spesifik antara skala operasi atau lokasi geografis pabrik yang dapat memengaruhi penerapan teknologi limbah cair.

Dalam skala yang lebih besar, pemanfaatan teknologi biogas sebagai alternatif pengelolaan limbah cair kelapa sawit masih terbatas. Meskipun terdapat potensi manfaat yang signifikan dalam mengurangi dampak lingkungan dan menciptakan sumber energi terbarukan, banyak pabrik masih menghadapi kesulitan dalam mengadopsi teknologi ini. Beberapa faktor dapat berkontribusi terhadap rendahnya adopsi teknologi biogas termasuk terbatasnya pengetahuan teknis, kebutuhan investasi awal, peraturan dan insentif yang mungkin tidak cukup untuk mendorong perubahan tata kelola.

Pentingnya peralihan ke praktik tata kelola yang lebih berkelanjutan di industri kelapa sawit tidak bisa dianggap remeh. Langkah-langkah inovatif, seperti penerapan sistem pengelolaan limbah cair mandiri, penggunaan teknologi biogas, dan upaya kolaborasi antara pemerintah, industri, dan berbagai pemangku kepentingan, berpotensi membawa perubahan positif. Dengan meningkatkan kesadaran akan manfaat jangka panjang dari pengelolaan yang lebih ramah lingkungan, diharapkan lebih banyak pabrik di Indonesia akan terdorong untuk mengadopsi praktik yang lebih berkelanjutan dalam mengelola air limbah kelapa sawit.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan teknologi pengelolaan limbah cair yang lebih maju, seperti pengomposan dan CSTR, dapat memberikan manfaat yang signifikan terhadap peningkatan ekonomi

sirkular di industri kelapa sawit. Oleh karena itu, pemerintah dan pemangku kepentingan perlu menginisiasi kebijakan insentif serta program edukasi untuk mendorong adopsi teknologi ini. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi aspek teknis dan finansial dari penerapan teknologi ini di berbagai skala operasional dan lokasi geografis. Selain itu, evaluasi dampak sosial dan lingkungan dari teknologi-teknologi tersebut dapat memberikan wawasan yang lebih holistik untuk mendukung keberlanjutan industri kelapa sawit di Indonesia.

## Simpulan

Kesimpulan dari studi ini menunjukkan bahwa kapasitas pabrik kelapa sawit tidak memengaruhi nilai sirkularitas karena proses pengolahan bahan baku murni relatif seragam tanpa praktik daur ulang. Pengelolaan limbah cair dengan nilai sirkularitas tertinggi dicapai melalui pengomposan, menghasilkan nilai 0,7065, sedangkan metode konvensional berbasis regulasi Indonesia memiliki nilai terendah sebesar 0,55 karena hanya memenuhi baku mutu tanpa pemanfaatan lebih lanjut. Tata kelola limbah cair yang mendukung ekonomi sirkular membutuhkan penerapan prinsip 5R, penggunaan teknologi modern, dan regulasi yang lebih spesifik. Selain itu, pengelolaan limbah cair yang inovatif, seperti pengomposan atau biogas, memiliki potensi besar untuk mengurangi limbah dan memberikan manfaat ekonomi jangka panjang. Kolaborasi antara pemerintah, industri, dan pemangku kepentingan diperlukan untuk mendukung adopsi teknologi ramah lingkungan. Penelitian mendatang dapat mengeksplorasi dampak geografis, analisis biaya-manfaat, dan potensi kolaborasi antar-industri untuk mempercepat transisi menuju ekonomi sirkular di sektor kelapa sawit.

## Referensi

- Ahmad, A. L., Ismail, S., & Bhatia, S. (2003). Water recycling from palm oil mill effluent (POME) using membrane technology. *Desalination*, 87-95.
- Aisyah, S., Yulianti, E., & Fasya, A. (2010). Pembuatan Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa Sawit. *Alchemy*, 53-103.
- Apria, W., Berlian, S., & Afghani, J. (2013). Karbon Aktif Dari Limbah Cangkang Sawit Sebagai Adsorben Gas Dalam Biogas Hasil Fermentasi Anaerobik Sampah Organik. 30-33.
- Budiarto, R. (2019). Potensi Energi Limbah Pabrik Kelapa Sawit.
- Bejarano, P.-A.C.; Rodriguez-Miranda, J.-P.; Maldonado-Astudillo, R.I.; Maldonado-Astudillo, Y.I.; Salazar, R. Circular Economy Indicators for the Assessment of Waste and By-Products from the Palm Oil Sector. *Processes* 2022, 10, 903. <https://doi.org/10.3390/pr10050903>
- Chong, M., Ng, W., Ng, D., Lam, H., Lim, D., & Law, K. (2017). A Mini Review of Palm Based Fertiliser Production in Malaysia. *Chemical Engineering Transaction*, 1585-1590.
- Elfidiyah, B. D., & Salni, F. (2012). Organic Liquid Fertilizer from Palm Oil Mill Effluent (POME) Enriched by Indigenous Bacteria Activator. *Technology, Science, Social Sciences and Humanities International Conferences 2012*. Malaysia: Universitas Teknologi Mara UiTM Kedah.
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). CIRCULARITY INDICATORS: An Approach to Measuring Circularity: METHODOLOGY [1].
- Ellen MacArthur Foundation. (2021). Retrieved from Ellen MacArthur Foundation: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/explore/the-circular-economy-in-detail>
- Elykurniati. (n.d.). Laporan Penelitian Pemanfaatan Limbah Padat Cangkang Kelapa Sawit Dalam Pembuatan Pupuk Cair Kalium Sulfat.
- Ginayati, L., Faisal, M., & Suhendrayatna. (2015). Pemanfaatan Asap Cair Dari Pirolisis Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Pengawet Alami Tahu. 7-11.
- Gusta, A., Kusumastuti, A., & Parapasan, Y. (2015). Pemanfaatan Zompos Kiambang dan Sabut Kelapa Sawit sebagai Media Tanam Alternatif pada Prenursery Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq). 151-155.
- Harris, A. J., & Mahmudsyah, S. (2013). Studi Pemanfaatan Limbah Padat dari Perkebunan Kelapa Sawit pada PLTU 6 MW di Bangka Belitung.
- Hasanudin, U., Sugiharto, R., Haryanto, A., Setiadi, T., & Fujie, K. (2015). Palm oil mill effluent treatment and utilization to ensure the sustainability of palm oil industries. *Water Science and Technology*, 1089-1095.
- Hendra, D. (2006). Pembuatan Arang Aktif dari Tempurung Kelapa Sawit dan Serbuk Kayu Gergajian Campuran. 1-22.
- Heryadi, M. G., Wijana, S., & L., R. N. (2014). Penggandaan Skala Proses Pembuatan Pulp dari Serabut Kelapa Sawit (*Elaeis Guineensis*). 1-9.
- Irwan, P. (2018). Energi terbarukan dari limbah cair pabrik kelapa sawit.

- Irwansyah, W. Y., Danial, & Hiendro, A. (n.d.). Potensi pemanfaatan Palm Oil Mill Effluent (POME) sebagai bahan baku Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) di PKS PT. Fajar saudara kusuma.
- Jannah, M. (2018). *Pemodelan Produksi Crude Palm Oil Menggunakan Sistem Dinamis untuk Mendukung Kelapa Sawit Berkelanjutan*. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Jati, A. W., Kusumawardhani, N., & Setyorini, E. (n.d.). Optimasi Pembuatan Pulp Serabut Sawit (*Elaeis guineensis*) Melalui Proses Hidrolisis dengan NaOH.
- Juanda. (2019). *BPTT Kembangkan Teknologi Konversi Biomasa Kelapa Sawit*. Jakarta: ITECH.
- Kachapocha, M., Samneanggam, J., Poolsawad, N., & Chinda, T. (2021). Measuring the Circularity of Crude Palm Oil. *Conference on Interdisciplinary Research*. Burapha University.
- Kasnawati. (2011). Penggunaan Limbah Sabut Kelapa Sawit Sebagai Bahan Untuk Mengolah Limbah Cair. 891-898.
- Khaidun, I., & Haji, A. (2010). Potensi Asap Cair Hasil Pirolisis Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Biopestisida Antifeedant. *Seminar Kimia FKIP Universitas Syiah Kuala Darussalam*, (pp. 552-555). Lampung.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions. *SSRN Electronic Journal*.
- Manusawai, H. (2011). Pengelolaan Limbah Padat Sabut Kelapa Sawit Sebagai Bahan Untuk Mengelola Limbah Cair.
- Muthita Kachapoch, e. (2021). *Measuring the Circularity of Crude Palm Oil*. Thailand: Burapha University International.
- Nazir, M. (2011). *Metode penelitian*. Bogor: Ghalia Indonesia.
- Parindui, L., & Parinduri, T. (2020). Konversi Biomasa Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Journal of Electrical Technology Vol.5*.
- Parinduri, L. (n.d.). *Analisa Pemanfaatan Pome Untuk Sumber Pembangkit Listrik Tenaga Biogas Di Pabrik Kelapa Sawit*.
- Rajani, A., Kusnadi, Santosa, A., Saepudin, A., Gobikrishnan, S., & Andriani, D. (2019). Review on biogas from palm oil mill effluent (POME): Challenges and opportunities in Indonesia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 293 012004*. IOP Publishing Ltd.
- Sahirman, S. (1994). *Kajian Pemanfaatan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit untuk Memproduksi Gas Bio*. Bogor: Program Pascasarjana IPB.
- Sri Rahayu, A., Karsiwulan, D., Yuwono, H., Trisnawat, I., Mulyasari, S., Rahardjo, S., . . . Paramita, V. (2015). *Buku Panduan Konversi POME menjadi Biogas. USAID dan Winrock Internasional*. Jakarta: Winrock International.
- Sudaryanti, D. A. (2017). *Analisa ekonomi pemanfaatan Palm Oil Mill Effluent (POME) menjadi Biopower*.
- Sudradjat, R., Erra, Y., Umi, K., & Evi, K. (2003). *Produksi biogas dari limbah pengolahan kelapa sawit dengan proses fermentasi padat*. Buletin Penelitian Hasil Hutan 21.
- Susilawati, S. (2015). *Pengelolaan Limbah Kelapa Sawit (Elaeis guineensis Jack) di Perkebunan Kelapa Sawit Riau*. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Syafrizal. (2015). Small Renewable Energy Biogas Limbah Cair (POME) Pabrik Kelapa Sawit Menggunakan Tipe Covered Lagon Solusi Alternatif Defisit Listrik Provinsi Riau. *Jurnal DISPROTEK*, 26-35.
- WBCSD. (2022). *Circular Transition Indicators V3.0 Metrics for Business by Business*.
- WIPO GREEN, & Winrock International. (2021). *Technological Options: For the Treatment and Valorization of Palm Oil Mill Effluent in Indonesia*. WIPO GREEN.
- Yacob, S., Hassan, M., Shirai, Y., Wakisaka, M., & Subash, S. (2006). Baseline study of methane emission from anaerobic ponds of palm oil mill effluent treatment. *Science of the Total Environment* 366, 187-196.
- Yeo, J., How, B., Teng, S., Leong, W., Ng, W., Lim, C., . . . Lam, H. (2020). Synthesis of Sustainable Circular Economy in Palm Oil Industry Using Graph-Theoretic Method. *Sustainability*, 2.
- Yoochatchaval, W., Kumakura, S. &, Yamaguchi, T. &, Chen, S., Kubota, K., Harada, H., & Syutsubo, K. (2011). Anaerobic degradation of palm oil mill effluent (POME). *Water science and technology*.
- Zulkifli, A. (2016). Analisis kelayakan potensi pembangunan PLTBg POME di wilayah perkebunan sawit. *Jurnal PASTI, Volume X No. 2*, 192-207.