

## DAMPAK GAS RUMAH KACA ARANG TEMPURUNG KELAPA DENGAN METODE LIFE CYCLE ASSESSMENT (BATASAN SISTEM GATE-TO-GATE)

### GREENHOUSE GAS IMPACT OF COCONUT SHELL CHARCOAL USING THE LIFE CYCLE ASSESSMENT METHOD (A GATE-TO-GATE SYSTEM BOUNDARY)

Tyara Puspaningrum<sup>1\*</sup>, Mohamad Yani<sup>1</sup>, Nastiti Siswi Indrasti<sup>1</sup>, Chandra Indrawanto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB University  
Jl. Raya Dramaga, Babakan Dramaga, Bogor 16680, Indonesia  
Email: tyarapuspaningrum@apps.ipb.ac.id

<sup>2</sup>Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian (BBP2TP), Bogor, Indonesia

Makalah: Diterima 25 April 2021; Diperbaiki 12 Maret 2022; Disetujui 20 April 2022

#### ABSTRACT

Charcoal is a coconut derivative product produced from burning coconut shells. In this study, coconut shell charcoal was obtained from the by-product of copra processing. The processing of coconut shell charcoal produces emissions that pollute the environment, which are greenhouse gas (GHG) emissions equivalent to CO<sub>2</sub>-eq. Life cycle assessment (LCA) is a method that can assess the environmental impact of a product throughout its life cycle. Net energy calculation was carried out to determine the energy efficiency of charcoal production in the form of net energy value (NEV) and net energy ratio (NER). The LCA studied was gate-to-gate, namely from coconut shell transportation to processing into charcoal with emission function units per 1 kg of coconut shell charcoal product. The study was conducted at CV X, located in Sukabumi, West Java, Indonesia. The calculation results show that the raw material transportation stage produced 0.0626 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg charcoal, while the pyrolysis stage produced 0.212 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg charcoal. Energy efficiency analysis showed NEV 9,398.66 MJ and NER 1.09. Recommendations for improvement that can be given are to produce charcoal in one place with a copra factory and produce liquid smoke from the combustion of charcoal. Charcoal production in one factory with a copra factory could reduce the GHG impact by 48%, increase NEV to 12,823.19 MJ, and increase NER to 1.13. Utilization of smoke into liquid smoke increased NEV and NER to 107,715.75 MJ and 2.03. Combining the two scenarios increased NEV and NER to 211,856.62 MJ and 2.10.

Keywords: coconut shell charcoal, life cycle assessment, net energy ratio, net energy value

#### ABSTRAK

Arang merupakan produk turunan kelapa yang diproduksi dari pembakaran tempurung kelapa. Pada penelitian ini, arang tempurung kelapa diperoleh dari hasil samping pengolahan kopra. Pengolahan arang tempurung kelapa menghasilkan emisi yang mencemari lingkungan, salah satunya emisi gas rumah kaca (GRK) yang setara CO<sub>2</sub>-eq. *Life cycle assessment* (LCA) merupakan metode yang dapat menilai kinerja atau dampak lingkungan dari suatu produk sepanjang daur hidupnya. Perhitungan *net energy* dilakukan untuk menentukan efisiensi energi dari produksi arang dalam bentuk *net energy value* (NEV) dan *net energy ratio* (NER). LCA yang dikaji dalam lingkup *gate-to-gate*, yaitu dari transportasi tempurung kelapa sampai dengan pengolahan menjadi arang dengan unit fungsi emisi per 1 kg produk arang tempurung kelapa. Kajian dilakukan di CV X yang berlokasi di Sukabumi, Jawa Barat. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tahap transportasi bahan baku menghasilkan 0,0626 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg arang sedangkan tahap pirolisis menghasilkan 0,212 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg arang. Analisis efisiensi energi menunjukkan NEV 9.398,66 MJ dan NER 1,09. Rekomendasi perbaikan yang dapat diberikan yaitu memproduksi arang satu tempat dengan pabrik kopra dan memproduksi asap cair dari hasil pembakaran arang. Produksi arang satu pabrik dengan pabrik kopra berpotensi menurunkan dampak GRK 48%, meningkatkan NEV menjadi 12.823,19 MJ, dan meningkatkan NER menjadi 1,13. Pemanfaatan asap menjadi asap cair meningkatkan NEV dan NER menjadi 107.715,75 MJ dan 2,03. Kombinasi kedua skenario meningkatkan NEV dan NER menjadi 211.856,62 MJ dan 2,10.

Kata kunci: arang tempurung kelapa, *life cycle assessment*, *net energy ratio*, *net energy value*

#### PENDAHULUAN

Indonesia merupakan produsen terbesar Kelapa (*Cocos nucifera* L.) di dunia dengan total produksi pada tahun 2019 sebesar 17,13 metrik ton, disusul Filipina 14,77 metrik ton, dan India 14,68 metrik ton (FAO, 2020). Kelapa adalah tanaman palma yang penting secara sosial-ekonomi di

Indonesia, 99% perkebunannya dimiliki oleh rakyat dan sebagian besar usaha masih berskala kecil sampai menengah (Alouw dan Wulandari, 2020). Dari seluruh produksi kelapa di Indonesia, sebagian besar terserap untuk produksi kopra 57,3% sedangkan sisanya untuk produksi santan 34,7%, dan minyak kelapa 8% (Winarno, 2014).

Produksi berbagai produk turunan kelapa menghasilkan produk samping, salah satunya tempurung kelapa. Tempurung kelapa merupakan hasil samping terbesar dari pengolahan produk turunan dengan bobot 35% dari buah kelapa (Winarno, 2014). Menurut Gunasekaran *et al.* (2012), tempurung kelapa berkontribusi sebagai limbah padat sebesar 3,18 juta ton per tahun.

Sebagai biomassa, tempurung kelapa mengandung komposisi kimiawi 33,61% selulosa, 36,51% lignin, 29,27% pentosan, dan 0,61% abu (Shelke *et al.*, 2014). Tempurung kelapa mengandung kadar abu rendah tetapi memiliki *volatile matter* tinggi sebesar 65-75% (Ting *et al.*, 2016). Tempurung kelapa juga mengandung unsur 74,3% C, 21,9% O, 0,2% Si, 1,4% K, 0,5% S, 1,7% P (Bledzki *et al.*, 2010). Tingginya kandungan karbon dalam tempurung kelapa berpotensi dijadikan sebagai arang tempurung kelapa. Tempurung kelapa memiliki sifat difusi termal yang lebih baik dibandingkan dengan biomassa lain seperti kayu, sehingga tempurung kelapa banyak dimanfaatkan sebagai bahan bakar baik dalam bidang industri, pangan, maupun rumah tangga. Tempurung kelapa juga memiliki karakteristik yang keras karena tingginya kandungan  $\text{SiO}_2$  45,05%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  15,6%, dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  12,4% sehingga arang yang dihasilkan lebih kuat dan tidak mudah hancur (Ting *et al.*, 2016).

Pemanfaatan tempurung kelapa saat ini sudah mulai berkembang seperti material untuk pelapis helm (Sulistyo *et al.*, 2019), material untuk konstruksi jalan (Ting *et al.*, 2016), bahan agregat kasar dalam beton (Singh *et al.*, 2020), katalis karbon (Aziz *et al.*, 2020) dan nanopartikel sebagai pengisi bahan komposit (Sulaeman *et al.*, 2018). Namun dengan kondisi petani rakyat dan usaha yang masih berskala kecil atau menengah, tempurung kelapa sebagian besar diproses sederhana menjadi produk arang tempurung kelapa. Arang tempurung kelapa dapat dimanfaatkan secara langsung maupun dijadikan sebagai bahan baku produk turunan lain seperti bahan campuran aspal (Ting *et al.*, 2016), biobriket (Budi, 2017), biopelet (Sukoyo *et al.*, 2020), dan arang aktif (Arena *et al.*, 2016). Menurut Arena *et al.* (2016) produksi 1 ton arang aktif membutuhkan tempurung kelapa sebanyak 6,7 ton.

Pada tahun 2016, Indonesia menghasilkan 14,5 miliar butir kelapa, sampai 2018 diperkirakan jumlah tersebut belum banyak berubah. Jumlah tersebut dikonversi menjadi 457,1 ribu ton arang asalan (*raw material charcoal*). Dari jumlah tersebut, sebanyak 273,11 ribu ton (40,97%) arang asalan diekspor sedangkan sisanya untuk kebutuhan domestik (PERPAKI, 2018). Produksi arang dari tempurung kelapa merupakan salah satu upaya pemanfaatan hasil samping industri kelapa untuk mengurangi biomassa atau limbah padat. Akan tetapi proses produksi arang juga menimbulkan dampak

lingkungan karena berbagai kegiatan yang dilakukan. Selain itu, pengolahan arang melibatkan proses pembakaran yang juga menghasilkan asap yang dapat mengakibatkan pencemaran udara (Supraptiningsih, 2020).

Salah satu dampak yang timbul dari produksi arang tempurung kelapa adalah dihasilkannya emisi gas rumah kaca (GRK). Dampak lingkungan berasal dari sistem produk arang tempurung mulai dari transportasi bahan baku sampai dengan proses produksinya. Dalam penelitian ini, bahan baku berasal dari hasil samping industri kopra di Sukabumi, Jawa Barat. Di beberapa industri kecil lainnya, bahan baku dapat berasal dari sisa pemerasan santan di pasar maupun sisa pengolahan produk turunan kelapa lainnya. Oleh karena itu, perhitungan dampak lingkungan produksi arang tempurung kelapa perlu dilakukan sebagai dasar untuk mengevaluasi dan meningkatkan kinerja lingkungannya.

Perhitungan potensi emisi GRK dapat dilakukan dengan pendekatan *life cycle assessment* (LCA). LCA adalah metode yang bersifat komprehensif dan kuantitatif untuk menganalisis dampak lingkungan yang dihasilkan dari sebuah produk atau pun jasa di sepanjang rantai sistem produk (BSN, 2016). Kajian tentang LCA terhadap berbagai produk agroindustri telah banyak dikembangkan. Akan tetapi kajian LCA produk turunan kelapa masih terbatas, baik di Indonesia maupun di luar negeri. Wiloso *et al.* (2018) menyebutkan bahwa masih sangat sedikit studi LCA yang dipublikasikan memperhatikan produk akhir, barang konsumen; sebagian besar ke produk perantara. Kajian tentang LCA di Indonesia sampai saat ini masih didominasi produk-produk berbasis bio seperti bioenergi, minyak sawit, jarak, beras, biomassa, dan produk perikanan (Wiloso *et al.*, 2018). Produk turunan kelapa Indonesia yang telah dikaji LCA yaitu asap cair dari tempurung kelapa (Yuliansyah, 2019), *virgin coconut oil* (VCO) (Setyorini, 2019), dan gula semut kelapa (Azzahra, 2020) (Tabel 1). Selain itu produk *Linear Alkylbenzenesulfonate* (LAS) dari minyak kelapa dan arang aktif telah dikaji di US dan UK (Fogliatti *et al.*, 2014; Arena *et al.*, 2016).

Besarnya dampak lingkungan dari produksi arang tempurung kelapa perlu diketahui sebagai dasar rekomendasi peningkatan kinerja lingkungan atau penurunan dampak lingkungan, terutama emisi GRK. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi input dan output dari sistem produk arang tempurung kelapa secara *gate-to-gate* (dari bahan baku sampai produksi), menghitung dampak emisi GRK dengan metode LCA, dan mengidentifikasi rekomendasi penurunan dampak emisi GRK dari produksi arang tempurung kelapa.

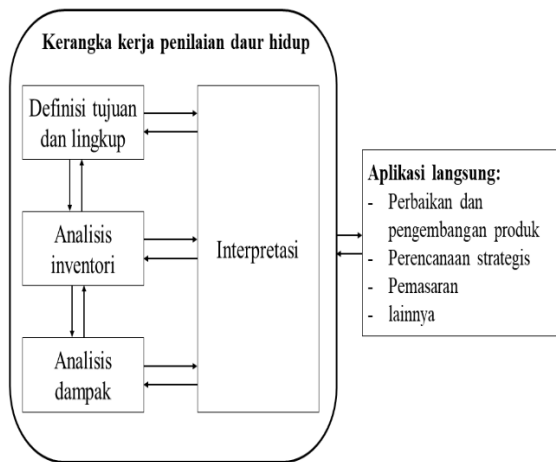
Tabel 1. Referensi LCA Produk Turunan Kelapa

Produk	Batasan Sistem	Emisi GRK (CO <sub>2</sub> eq)	Sumber
Arang tempurung	Gate-to-gate	0,18 kg/kg produk	(Yuliansyah, 2019)
Asap cair grade 1	Gate-to-gate	1,57 kg/L produk	(Yuliansyah, 2019)
Asap cair grade 2	Gate-to-gate	1,11 kg/L produk	(Yuliansyah, 2019)
Asap cair grade 3	Gate-to-gate	0,66 kg/L produk	(Yuliansyah, 2019)
Virgin coconut oil (VCO)	Gate-to-gate	1,455 kg/L produk	(Setyorini, 2019)
Gula semut kelapa	Cradle-to-gate	21 kg/kg produk	(Azzahra, 2020)

**METODE PENELITIAN**

**Life Cycle Assessment (LCA)**

Metode LCA digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari produksi arang tempurung kelapa. Prosedur *life cycle assessment* (LCA) terdiri atas empat tahapan secara umum yaitu: penentuan tujuan dan ruang lingkup, analisis inventori, analisis dampak lingkungan, interpretasi hasil, dan rekomendasi perbaikan. Kerangka tahapan LCA berdasarkan ISO/SNI 14044:2016 dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka tahapan LCA

**Penentuan Tujuan dan Ruang Lingkup**

Pada tahap pertama ditentukan tujuan dan batasan atau ruang lingkup dari kajian LCA yang akan dilakukan. Secara umum terdapat empat jenis batasan sistem dalam kajian LCA, yaitu: (1) *Cradle to grave*: termasuk bahan dan rantai produksi energi semua proses dari ekstraksi bahan baku melalui tahap produksi, transportasi dan penggunaan hingga produk akhir dalam siklus hidupnya; (2) *Cradle to gate*: meliputi semua proses dari ekstraksi bahan baku melalui tahap produksi (proses dalam pabrik); (3) *Gate to grave*: meliputi proses dari penggunaan pasca produksi sampai pada akhir-fase kehidupan siklus hidupnya; dan (4) *Gate to gate*: meliputi proses dari tahap produksi saja (Gabi, 2010). Pada penelitian ini, ruang lingkup dibatasi pada *gate-to-gate*, yaitu mulai dari transportasi bahan baku dari pabrik kopra sampai pengolahan tempurung kelapa menjadi arang.

Selain itu, pada tahap ini juga dilakukan penentuan unit fungsi yang akan digunakan pada

penilaian dengan metode LCA. Tujuan dari penetapan unit fungsi adalah untuk memberikan acuan normalisasi masukan dan keluaran. Unit fungsi yang digunakan dalam kajian LCA ini yaitu satu kg produk arang tempurung kelapa.

**Analisis Inventori**

Analisis inventori berisi identifikasi input dan output dalam siklus hidup produk. Input berupa sumber daya baik bahan baku maupun energi. Output berupa produk utama, produk samping, emisi, atau limbah. Identifikasi input, proses dan output yang sudah dilakukan, kemudian dihitung secara kuantitatif menggunakan neraca massa dan neraca energi, untuk menggambarkan aliran bahan dan energi dengan jelas yang akan digunakan pada tahapan LCA selanjutnya, yaitu analisis dampak lingkungan.

**Analisis Dampak**

Analisis dampak dilakukan untuk mengkaji atau mengevaluasi dampak lingkungan yang dihasilkan berdasarkan hasil analisis inventori. Dampak lingkungan yang dihitung adalah gas rumah kaca (GRK) yang berkontribusi terhadap pemanasan global. Emisi GRK direpresentasikan dalam *Global Warming Potential* (GWP, 100) yaitu jumlah output gas CO<sub>2</sub> dan *input – output* energi dalam siklus hidup produk arang. Perhitungan yang dilakukan mengacu pada rumus dari *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (2006) dan literatur lain yang relevan berdasarkan Persamaan (1).

$$\text{Emisi GRK (CO}_2\text{e)} = A \times CF \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

- Emisi GRK : Emisi GK (kg CO<sub>2</sub>-eq)
- A : Data inventori terhadap unit fungsi (kg)
- CF : *Characterization factor* (faktor karakterisasi) (kg CO<sub>2</sub>-eq/A)

**Interpretasi Hasil**

Tahap keempat dari LCA adalah melakukan interpretasi dari hasil analisis inventori dan analisis dampak. Interpretasi dilakukan dengan menentukan *hotspot* atau tahapan proses yang berpengaruh paling besar terhadap dampak. *Hotspot* tersebut menjadi perhatian untuk diterapkan strategi perbaikan dalam rangka menurunkan dampak dan meningkatkan efisiensi energi.

### Analisis Energi

Analisis energi dilakukan untuk mengevaluasi *net energy* pada proses produksi kopra dalam lingkup siklus hidupnya. Metode yang digunakan untuk estimasi *net energy* adalah dengan konversi penggunaan energi kepada satuan energi standar (Joule). Kebutuhan energi dalam setiap produksi 1 kg arang tempurung kelapa dapat dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$E_n = n \times EF \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

- $E_n$  : Energi (MJ)
- $n$  : Volume inventori (kg)
- CV : *Calorific value* (nilai konversi energi) (MJ/kg)

Efisiensi energi dinyatakan dalam *Net Energy Value* (NEV) dan *Net Energy Ratio* (NER). Perhitungan NER dan NEV seperti dalam Persamaan (3) dan (4). Performa *net energy* yang baik ditunjukkan oleh NEV yang positif dan  $NER > 1$

$$NEV = \sum E_{n_o} - \sum E_{n_i} \dots\dots\dots (3)$$

$$NER = \frac{\sum E_{n_o}}{\sum E_{n_i}} \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

- NEV : *Net Energy Value*
- NER : *Net Energy Ratio*
- $\sum E_{n_o}$  : Total energi keluar (MJ)
- $\sum E_{n_i}$  : Total energi masuk (MJ)

### Rekomendasi Perbaikan

Tahap terakhir setelah analisis dampak dan analisis energi adalah memberikan rekomendasi perbaikan. Rekomendasi perbaikan ditujukan untuk menurunkan dampak lingkungan dan meningkatkan efisiensi energi.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Proses Produksi Arang Tempurung Kelapa

Produksi arang dari tempurung kelapa terjadi melalui proses pirolisis atau karbonisasi yang menghilangkan unsur-unsur bukan karbon seperti hidrogen (H) dan oksigen (O) dan menyisakan kandungan karbon (C) yang tinggi dalam bahan. Pirolisis mengubah rantai panjang senyawa karbon, hidrogen, dan oksigen dari komponen biomassa menjadi molekul yang lebih kecil dalam bentuk gas, uap yang dapat dikondensasi, dan arang padat (Jahirul *et al.*, 2012). Karbonisasi merupakan proses konversi suatu zat organik menjadi karbon atau residu yang mengandung karbon (Tirono dan Sabit, 2011). Prinsip karbonisasi dalam pembakaran tempurung kelapa adalah menghilangkan kandungan air dan material lain dalam tempurung kelapa yang tidak dibutuhkan oleh arang.

Pada penelitian ini, arang tempurung diproses dari pembakaran tempurung kelapa yang bersumber dari hasil samping pengolahan kopra di CV X. Bahan baku ditransportasikan dari pabrik kopra (PK) ke pabrik arang (PA) yang berjarak 10,5 km. Proses produksi dilakukan dengan prinsip pirolisis menggunakan *kiln drum* berkapasitas 50 kg tempurung kelapa yang dilengkapi dengan penutup dan cerobong. Penutup tersebut dihubungkan oleh pipa penghubung agar asap hasil pembakaran yang terkumpul pada bagian penutup dapat disalurkan menuju pipa kondenser agar terjadi proses kondensasi. Tahap ini dilakukan selama 2-3 jam dan pada akhir tahap pembakaran dihasilkan arang tempurung kelapa dengan total rendemen 36,20% yang terdiri atas arang matang 32,58% (arang tempurung kelapa jadi/ATKJ) dan arang mentah 3,62% (arang tempurung kelapa mentah/ATKM).

### LCA Produk Arang Tempurung Kelapa

#### Tujuan dan Ruang Lingkup

Tujuan *life cycle assessment* (LCA) pada produk arang yaitu untuk mengetahui kinerja lingkungan dari produk arang tempurung kelapa dari hasil samping produk kopra, mengidentifikasi tahapan proses yang menjadi *hotspot*, serta memberikan rekomendasi perbaikan sehingga dapat terwujud agroindustri arang tempurung kelapa yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Ruang lingkup yang diamati pada penelitian ini adalah produk arang tempurung kelapa, mulai dari transportasi dari tempat pengolahan kopra ke tempat pengolahan arang sampai dengan pengolahan menjadi produk arang (*gate-to-gate*). Pada penelitian ini, ruang lingkup dibatasi dari transportasi bahan baku yaitu tempurung kelapa dari pabrik kopra (PK) ke pabrik arang (PA) dan proses pengolahan tempurung kelapa menjadi arang. Lingkup *gate-to-gate* dalam LCA hanya memperhitungkan input dan output di batasan sistem produk tanpa mempertimbangkan proses ekstraksi bahan baku dan pengelolaan limbah. Namun demikian, lingkup *gate-to-gate* dapat berguna untuk banyak aplikasi seperti sebagai basis data dalam sistem manajemen lingkungan di perusahaan (Klopffer dan Grahl, 2014).

Unit fungsi (*functional unit*) yang menjadi acuan pada penelitian LCA ini yaitu 1 kg arang tempurung kelapa. Gambar 2 menunjukkan *system boundary* atau ruang lingkup LCA produk arang tempurung kelapa.

#### Life Cycle Inventory (LCI)

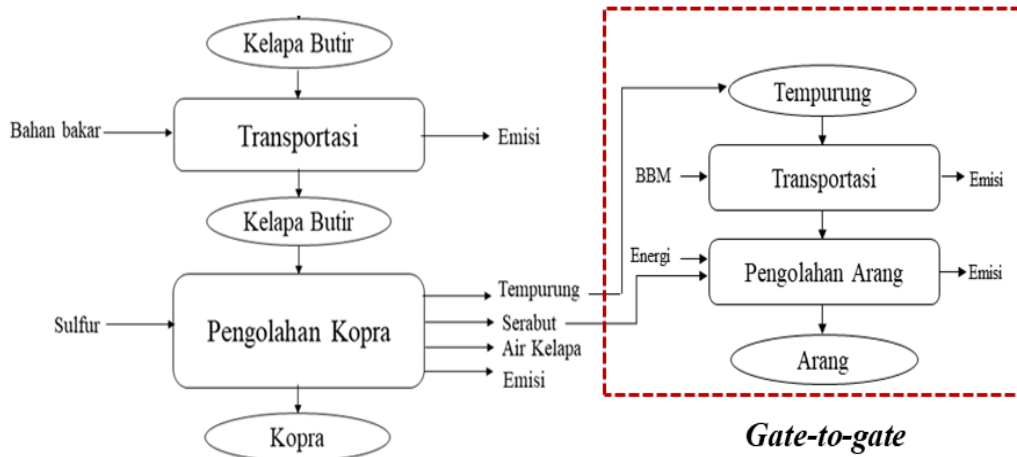
Analisis dampak gas rumah kaca (GRK) pada kegiatan produksi arang tempurung kelapa dalam lingkup kajian *gate to gate*, diawali dengan analisis *Life Cycle Inventory* (LCI). Analisis LCI didefinisikan sebagai fase LCA yang melibatkan kompilasi dan penghitungan *input* dan *output* untuk sistem produk tertentu sepanjang siklus hidupnya

(ISO/SNI 14040:2016). Terdapat dua tahapan proses yang dilalui pada sistem produksi arang tempurung kelapa, yaitu transportasi tempurung kelapa dari pabrik kopra (PK) ke pabrik arang (PA) dan proses produksi arang dari tempurung kelapa (pirolisis).

Jarak transportasi dari PK yang berlokasi di Sukaraja, Sukabumi ke PA yang berlokasi di Salabintana, Sukabumi yaitu sejauh 10,5 km sehingga total jarak yang ditempuh yaitu 21 km. Pengangkutan bahan baku dilakukan dengan menggunakan mobil *pick up* berbahan bakar bensin. Kebutuhan terhadap bahan bakar dihitung dengan menggunakan asumsi 0,1 L/km (Oetomo *et al.*, 2006). Analisis LCI pada sistem produksi arang tempurung kelapa dilakukan dengan menghitung *input* dan *output* di setiap tahapan

proses dengan satuan unit per 1 kg produk arang yang disajikan pada Tabel 2.

Pada proses produksi, digunakan listrik untuk *blower* dan lampu. *Blower* digunakan pada awal pirolisis yang berfungsi untuk meniupkan udara pada kiln drum sehingga proses pirolisis lebih stabil dan cepat yaitu selama 2-3 jam. *Blower* dinyalakan pada awal proses untuk mendistribusikan nyala api dari bahan bakar dan pada pertengahan proses untuk menjaga nyala api agar tidak padam. *Blower* yang digunakan memiliki daya 220 V dengan arus 1 A. Total waktu *blower* dinyalakan yaitu sekitar 30 menit per batch sehingga listrik dari *blower* sebesar 0,11 kWh. Selain dari *blower*, listrik juga digunakan pada lampu untuk penerangan sebesar 0,096 kWh per batch



Gambar 2. Lingkup kegiatan gate-to-gate produksi arang tempurung kelapa

Tabel 2. Hasil analisis inventori produksi arang tempurung kelapa

Proses	Input/Output	Nilai	Satuan Unit (Per 1 kg Arang)
Transportasi PK ke PA	<b>Input</b>		
	- Tempurung + Serabut Kelapa	5,6007	kg/kg
	- Bensin	0,9959	MJ/kg
	<b>Output</b>		
	- Tempurung + Serabut Kelapa	5,6007	kg/kg
Produksi Arang (Pirolisis)	<b>Input</b>		
	- Tempurung Kelapa	3,0694	kg/kg
	- Bahan Bakar Tempurung Kelapa (BB-TK)	1,4975	kg/kg
	- Bahan Bakar Serabut Kelapa (BB-SK)	0,0803	kg/kg
	- Listrik	0,1147	MJ/kg
	<b>Output</b>		
	- Arang Tempurung Kelapa Jadi (ATKJ)	1,0000	kg/kg
	- Arang Tempurung Kelapa Mentah (ATKM)	0,1111	kg/kg
- Abu BB-TK	0,0195	kg/kg	
- Abu BB-SK	0,0014	kg/kg	
- Volatile organic compounds (VOC)	1,9583	kg/kg	

Hasil analisis LCI pada proses produksi arang menunjukkan, tempurung kelapa merupakan bahan

yang memiliki nilai tertinggi per satuan unit yang dianalisis dan terbagi menjadi dua bagian dengan

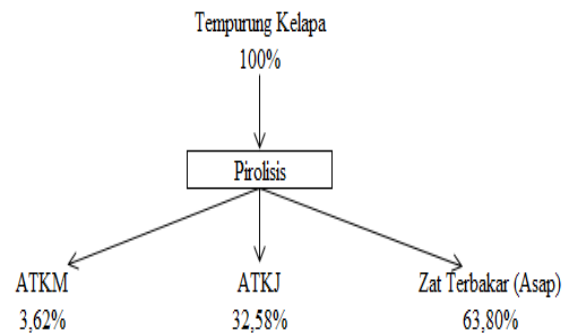
fungsi yang berbeda, yaitu sebagai bahan baku produksi arang tempurung kelapa dengan nilai 3,0694 kg per satuan unit dan sebagai bahan bakar dengan nilai 1,4975 kg per satuan unit. Produksi arang tempurung kelapa menghasilkan asap pembakaran atau zat terbakar (*volatile matter*) yang memiliki nilai tertinggi ke dua yaitu 1,9583 kg per satuan unit. Nilai tempurung kelapa dan *volatile matter* yang tinggi sebagai kategori dampak dan menjadi acuan dalam analisis potensi dampak GRK pada LCA karena nilai tempurung kelapa dan zat terbakar berada di atas nilai satuan unit. Semakin tinggi rendemen arang tempurung kelapa jadi yang dihasilkan, akan mengurangi nilai input dan output per satuan unit.

Rendemen arang tempurung kelapa jadi (ATKJ) yaitu arang yang matang sempurna adalah sebesar 32,58%, sedangkan 3,62% masih berupa arang tempurung kelapa mentah (ATKM), serta 63,80% zat terbakar dari tempurung kelapa (Gambar 3). Proses pembakaran tempurung kelapa di CV X dengan bahan bakar tempurung kelapa terjadi selama 2-3 jam pada suhu 400-500°C dengan bahan bakar tempurung dan serabut kelapa. Proses karbonisasi menggunakan metode ini lebih cepat dibandingkan proses pembakaran arang lain dengan waktu pirolisis selama 9 jam menghasilkan rendemen 29,54% (Yuliansyah, 2019) dan waktu pirolisis 6 jam dengan rendemen 35% (Budi, 2011). Tingkat kematangan arang dipengaruhi oleh suhu dan jenis karbonisasi (Darmawan *et al.*, 2015). Dengan demikian, perlu dilakukan pengaturan dan pemantauan suhu secara kuantitatif agar kematangan arang bisa lebih merata sehingga rendemen lebih meningkat.

### Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Tahapan ketiga dalam LCA adalah penilaian dampak lingkungan atau LCIA. LCIA adalah metode yang digunakan untuk memperjelas intensitas hasil analisis LCI sehubungan dengan dampak

lingkungannya, seperti perubahan iklim (*climate change*), kesehatan manusia (*human health*), dan keanekaragaman hayati (*biodiversity*). LCIA juga digunakan untuk melakukan evaluasi komprehensif dengan mengintegrasikan dampak lingkungan (Tabata, 2018).



Gambar 3. Rendemen produk dan hasil samping proses pirolisis

LCIA yang dinilai pada penelitian ini adalah emisi GRK yang dilakukan dengan mengonversi gas-gas selain CO<sub>2</sub> seperti CH<sub>4</sub> dan N<sub>2</sub>O menjadi gas CO<sub>2</sub> sehingga nilai emisi GRK yang dihasilkan dinyatakan sebagai CO<sub>2</sub>-equivalent (CO<sub>2</sub>-eq) yang memiliki dampak lingkungan setara dengan gas CO<sub>2</sub> (Menon, 2014).

Perhitungan nilai emisi GRK dilakukan berdasarkan data inventori yang telah diidentifikasi pada tahap LCI pada masing-masing tahapan produksi. Inventori dikalikan dengan faktor emisi bahan akan menghasilkan nilai dampak GRK. Faktor emisi yang digunakan merujuk pada IPCC (2006) dan Kementerian ESDM (2019). Tabel 3 menunjukkan hasil perhitungan dampak GRK dari arang tempurung kelapa dengan satuan unit 1 kg.

Tabel 3. Hasil analisis dampak GRK lingkup *gate-to-gate* per 1 kg arang

Proses	Sumber Emisi	Faktor Karakterisasi (kg CO <sub>2</sub> -eq/ satuan)	Emisi GRK (kg CO <sub>2</sub> -eq)
Transportasi	Bensin (L)	2,152 <sup>a</sup>	0,0626
	Sub total		0,0626
Produksi	Listrik (kWh)	0,867 <sup>b</sup>	0,0276
	BB-TK (kg)	0,110 <sup>c</sup>	0,1647
	BB-SK (kg)	0,110 <sup>c</sup>	0,0088
	Sub total		0,2012
<b>Total</b>			<b>0,2638</b>

Sumber:

- IPCC (2006)
- Kementerian ESDM (2019)
- Winnipeg (2012)

Berdasarkan data di atas, emisi dihasilkan dari tahap transportasi maupun produksi. Pada tahap transportasi, dihasilkan emisi dari penggunaan bahan bakar minyak jenis bensin yang digunakan untuk mengangkut bahan baku dari PK ke PA sejauh total 21 km. Pada proses produksi atau pirolisis, dihasilkan emisi dari listrik, bahan bakar tempurung kelapa, dan bahan bakar serabut kelapa. Tempurung kelapa digunakan sebagai bahan bakar untuk menjaga proses pirolisis berlangsung selama 2-3 jam. Serabut kelapa juga digunakan untuk bahan bakar sebagai penyulut api sehingga jumlahnya lebih sedikit. Emisi listrik menempati urutan kedua pada proses produksi. Emisi listrik dihasilkan dari penggunaan *blower* pada saat pirolisis dan penggunaan lampu untuk penerangan.

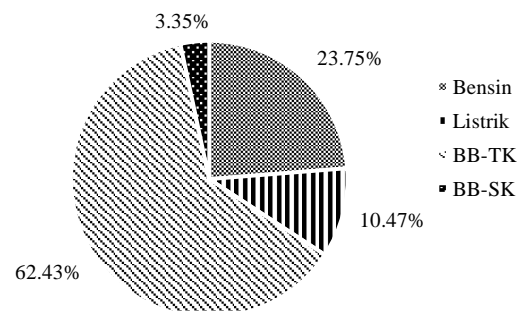
Tabel 3 menunjukkan bahwa 1 kg arang tempurung kelapa menghasilkan emisi GRK sebesar 0,2638 kg CO<sub>2</sub>-eq yang terbagi atas 0,0626 kg CO<sub>2</sub>-eq dari transportasi bahan baku dan 0,2012 kg CO<sub>2</sub>-eq dari proses produksi. Hasil ini lebih tinggi dibandingkan emisi GRK arang tempurung kelapa secara *gate-to-gate* dengan bahan baku berasal dari pasar yang memiliki nilai 0,18 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg produk (Yuliansyah, 2019).

Dari satu siklus tanaman kelapa sampai umur 50 tahun dengan asumsi mulai berproduksi di umur ke-6, dihasilkan tempurung kelapa utuh sejumlah 15.704,41 kg. Dari total tersebut, 67,21% digunakan sebagai bahan baku arang dan 32,79% digunakan sebagai bahan bakar pada proses produksi arang tempurung kelapa. Dari proses pirolisis, dihasilkan total produk sejumlah 3.438,80 kg arang tempurung kelapa yang diproduksi selama 394,26 batch/siklus/ha tanaman kelapa. Kontribusi akumulasi dampak produksi selama 1 siklus tanaman kelapa per ha dapat dilihat pada Tabel 4.

**Interpretasi Hasil**

Langkah keempat dari LCA adalah interpretasi hasil. Hasil dari analisis dampak menunjukkan bahwa proses transportasi memberikan dampak GRK sebesar 0,0626 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg arang sedangkan dampak proses pembakaran atau pirolisis sebesar 0,2012 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg arang. Nilai kontribusi dampak dari transportasi dengan bahan bakar bensin

sebesar 23,75% dan proses pirolisis sebesar 76,25% yang terbagi atas emisi dari listrik, bahan bakar tempurung kelapa, dan bahan bakar serabut kelapa. Secara keseluruhan, emisi terbesar (*hotspot*) dihasilkan dari bahan bakar tempurung kelapa (62,43%). Hal ini dikarenakan proses produksi arang di CV X tidak melibatkan bahan bakar fosil sehingga memanfaatkan tempurung kelapa sebagai bahan bakar utama dengan jumlah yang besar. Pembakaran dibantu dengan *blower* untuk menjaga nyala api sehingga juga menghasilkan emisi listrik. Gambar 4 menunjukkan persentase emisi yang dihasilkan dari proses produksi arang.



Gambar 4. Persentase penghasil dampak GRK pada produksi arang tempurung kelapa (*gate-to-gate*)

**Efisiensi Energi**

Berdasarkan data inventori dapat diketahui bahwa penggunaan bensin dan listrik PLN merupakan sumber energi utama untuk penyediaan energi. Bensin digunakan untuk proses transportasi sebagai bahan bakar *pick up* pembawa tempurung kelapa. Berdasarkan informasi tersebut, penggunaan bensin dapat menjadi informasi penggunaan energi pada produksi arang tempurung kelapa di CV X. Pada proses pengolahan, terdapat energi listrik yang digunakan untuk menyalakan *blower* serta energi bahan bakar dari biomassa tempurung kelapa dan serabut kelapa.

Tabel 4. Akumulasi dampak GRK arang tempurung kelapa (*gate-to-gate*) selama 1 siklus

Proses	Sumber Emisi	Jumlah		Emisi GRK (kg CO <sub>2</sub> -eq)
Transportasi PK ke PA	BBM-Bensin	100,132	L	215,44
Pirolisis	Listrik	109,605	kWh	95,03
	BB-TK	5.149,475	kg	566,44
	BB-SK	275,980	kg	30,36
Total Emisi GRK				907,26

Perhitungan *net energy* dilakukan dengan mengalikan inventori dengan nilai kalor bahan. Nilai

kalor BBM bensin yaitu sebesar 34,2 MJ/L dan nilai kalor listrik sebesar 3,6 MJ/kWh (IPCC, 2006). Nilai

kalor bahan diperoleh berdasarkan hasil pengujian yang ditampilkan pada Tabel 5. Nilai kalor arang tempurung kelapa mentah diasumsikan dengan 75% telah menjadi arang dan 25% masih menjadi tempurung. Hasil perhitungan *net energy* untuk produksi arang tempurung dalam satu siklus ditunjukkan pada Tabel 6. Nilai *net energy* produksi arang selama satu siklus menunjukkan NEV sebesar 9.398,66 MJ dan NER 1,09. Nilai NEV yang positif dan NER lebih dari 1 menandakan efisiensi energi sudah baik atau efisien (Suprihatin *et al.*, 2015).

**Material and Energy Flow Analysis (MEFA)**

*Material and Energy Flow Analysis* (MEFA) adalah alat efektif yang memberi gambaran dalam mengusulkan sistem berkelanjutan dalam beberapa kasus. MEFA dilakukan dalam 3 tahap, yaitu pembuatan diagram skema aliran material dan energi dari sistem target, melengkapi data yang terkait dengan aliran material dan energi sebagai data *input* dan *output*, dan melakukan penilaian *Net Energy Value* (NEV) dan *Net Energy Ratio* (NER) (Naohiro *et al.*, 2015). MEFA pada sistem produksi arang tempurung kelapa dilakukan dengan menghitung aliran *input* dan *output* dari energi dan aliran *input* dan *output* dari massa di setiap tahapan proses. Hasil analisis MEFA ditunjukkan pada Gambar 5.

**Rekomendasi Perbaikan**

Berdasarkan hasil penilaian terhadap dampak dari produksi arang maka dapat diidentifikasi rekomendasi perbaikan untuk menurunkan dampak GRK dan meningkatkan efisiensi energi. Beberapa

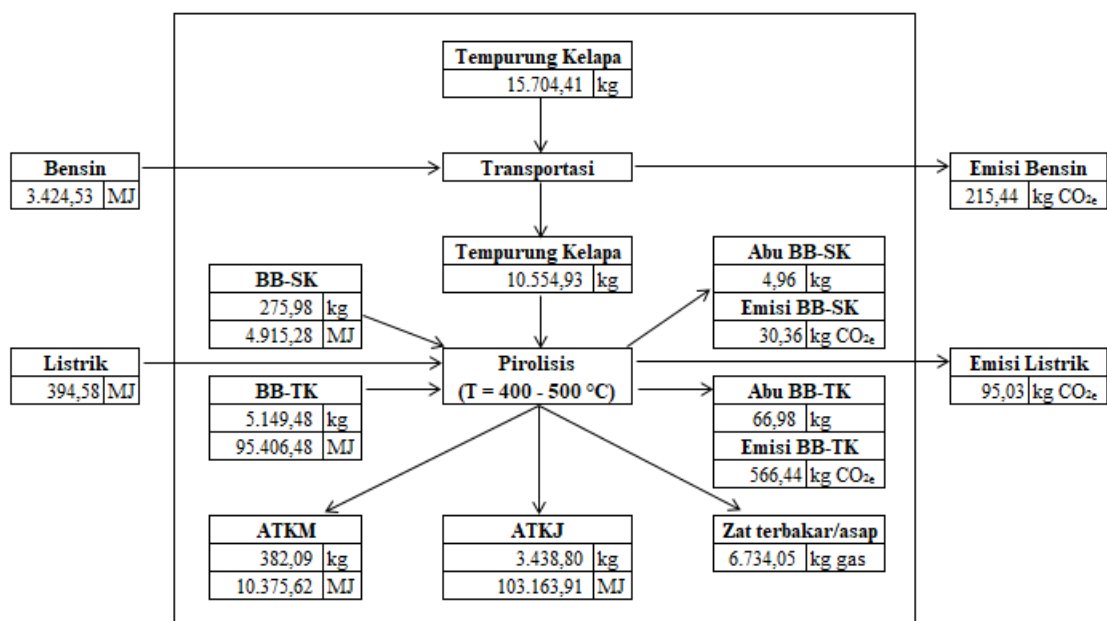
rekomendasi perbaikan yang dapat diberikan antara lain: 1) memproduksi arang satu tempat dengan pabrik kopra, 2) memproduksi asap cair dari hasil samping pembakaran arang.

Tabel 5. Nilai kalor bahan berdasarkan hasil pengujian di laboratorium

Bahan	Nilai Kalor (MJ/kg)	Std
Tempurung Kelapa	18,62	0,02
Serabut Kelapa	17,81	0,05
Arang Tempurung Kelapa	30,00	0,02

Tabel 6. Net energy produksi arang tempurung kelapa selama 1 siklus

Input dan Output Energi	Energi (MJ)
Input:	
- BBM Bensin	3.424,53
- Listrik	394,58
- BB-TK	95.406,48
- BB-SK	4.915,28
Total Input Energi	104.140,87
Output:	
- Arang Tempurung Kelapa Jadi (ATKJ)	103.163,91
- Arang Tempurung Kelapa Mentah (ATKM)	10.375,62
Total Output Energi	113.539,53
Net Energy Value (NEV)	9.398,66
Net Energy Ratio (NER)	1,09



Gambar 5. Hasil MEFA produksi arang tempurung kelapa 1 siklus (gate-to-gate)

Produksi arang satu tempat dengan pabrik kopra merupakan upaya untuk mengurangi jarak dan

penggunaan bahan bakar minyak bensin. Penerapan rekomendasi ini berpotensi menurunkan dampak



GRK sebesar 48%. Sebagaimana diketahui bahwa dampak transportasi memiliki kontribusi 48% terhadap total dampak GRK dari produk arang tempurung kelapa lingkup *gate-to-gate*. Selain itu, kegiatan ini dapat menurunkan input energi sebesar 3424,53 MJ selama satu siklus, sehingga dapat meningkatkan NEV menjadi 12.823,19 MJ dan NER menjadi 1,13.

Memproduksi asap cair dari hasil pembakaran arang merupakan upaya yang dapat diterapkan untuk memanfaatkan asap dari hasil samping pirolisis arang. Asap cair merupakan suatu larutan campuran dari dispersi koloid asap kayu dalam air hasil kondensasi yang mengandung sejumlah senyawa yang terbentuk akibat pirolisis konstituen kayu seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin (Rasi *et al.*, 2017). Asap dari pembakaran arang memiliki porsi terbesar yaitu 6.734,05 kg per siklus arang. Kegiatan ini dapat berdampak menghasilkan output produk yang lebih banyak sehingga efisiensi energi lebih tinggi. Dengan asumsi nilai kalor asap cair 14,60 MJ/kg (Yuliansyah, 2019), skenario 2 meningkatkan NEV menjadi 107.715,75 MJ dan NER menjadi 2,03. Asap cair berpotensi sebagai bahan pengawet alami, antioksidan, dan antimikroba pada produk olahan maupun produk hortikultura (Supraptiningsih, 2020).

Jika skenario 1 dan skenario 2 digabungkan, NER dan NEV akan semakin meningkat menjadi 211.856,62 MJ dan 2,10. Produksi asap cair dari gas pembakaran arang dapat mencegah polusi asap yang ditimbulkan sehingga tidak mengganggu lingkungan sekitar pabrik. Pemanfaatan asap cair juga dapat memberikan nilai tambah bagi industri. Pemilihan skenario perlu dilakukan analisis kelayakan lebih lanjut dengan mempertimbangkan aspek ekonomi, teknis dan teknologi, lingkungan, serta sumber daya.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

LCA arang tempurung kelapa dikaji dalam lingkup *gate-to-gate*, yaitu dari transportasi tempurung kelapa sampai dengan pengolahan menjadi arang dengan unit fungsi 1 kg produk arang tempurung kelapa yang dikonversi menjadi satu siklus arang tempurung kelapa dengan jumlah produk 3.438,80 kg. Dampak lingkungan yang dianalisis adalah potensi emisi gas rumah kaca yang setara CO<sub>2</sub>-eq. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tahap transportasi bahan baku menghasilkan 0,0626 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg arang atau setara 215,44 kg CO<sub>2</sub>-eq/siklus, sedangkan dampak produksi yaitu 0,2012kg CO<sub>2</sub>-eq/kg arang atau setara 691,82 kg CO<sub>2</sub>-eq/siklus. Nilai *net energy* produksi arang selama satu siklus menunjukkan total NEV sebesar 9.398,66 MJ dan NER 1,09. Rekomendasi perbaikan yang dapat diberikan yaitu memproduksi arang satu tempat dengan pabrik kopra dan memproduksi asap cair dari hasil samping pembakaran arang. Produksi arang satu pabrik dengan pabrik kopra berpotensi menurunkan

dampak GRK 48%, meningkatkan NEV menjadi 12.823,19 MJ, dan meningkatkan NER menjadi 1,13 untuk satu siklus arang. Pemanfaatan asap menjadi asap cair meningkatkan NEV dan NEV menjadi 107.715,75 MJ dan 2,03. Kombinasi kedua skenario meningkatkan NEV dan NER menjadi 211.856,62 MJ dan 2,10.

### Saran

Sebaiknya dilakukan kajian yang lebih komprehensif untuk LCA arang tempurung kelapa dengan batasan sistem *cradle-to-gate* atau dari budi daya tanaman kelapa, produksi kopra, produksi arang, sampai pemanfaatan asap hasil samping arang menjadi asap cair. Analisis kelayakan untuk perbaikan sistem produk juga perlu dilakukan dengan mempertimbangkan aspek ekonomi, lingkungan, teknologi, dan sumber daya.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia yang telah mendanai penelitian ini melalui beasiswa program Pendidikan Magister Menuju Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU) dengan nomor kontrak 2129/IT3.L1/PN/2021.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alouw JC dan Wulandari S. 2020. Present status and outlook of coconut development in Indonesia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 418 (2020) – 1<sup>st</sup> International Conference on Sustainable Plantation.
- Arena N, Lee J, dan Clift R. 2016. Life cycle assessment of activated carbon production from coconut shells. *Journal of Cleaner Production*. 125 (2016): 68-77.
- Aziz I, Kurnianti Y, Saridewi N, Adhani L, Permata W. 2020. Utilization of coconut shell as Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst support for catalytic cracking of jatropha oil into biofuel. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*. 23 (2): 39-45.
- Azzahra MA. 2020. Dampak emisi gas rumah kaca produk gula semut dengan pendekatan *life cycle assessment* [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Bledzki AK, Mamun AA, dan Volk J. 2010. Barley husk and coconut shell reinforced polypropylene composites: The effect of fibre physical, chemical and surface properties. *Composites Science and Technology*. 70: 840-846.
- [BSN] Badan Standardisasi Nasional. 2016. SNI ISO 14040:2016. Manajemen Lingkungan – Penilaian Daur Hidup – Prinsip dan Kerangka Kerja.

- Budi E. 2011. Tinjauan Proses Pembentukan dan Penggunaan Arang Tempurung Kelapa Sebagai Bahan Bakar. *Jurnal Penelitian Sains*. 14 (4): 25-29.
- Budi E. 2017. Pemanfaatan briket arang tempurung kelapa sebagai sumber energi alternatif. *Jurnal Sarwahita*. 14 (1): 81-84.
- Darmawan S, Syafii W, Wistara NJ, Maddu A, Pari G. 2015. Kajian struktur arang-pirolisis, arang-hidro dan karbon aktif dari kayu *Acacia mangium* Willd. Menggunakan difraksi sinar-X. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 3(2):81-92.
- Direktorat Jenderal Perkebunan. 2019. *Statistik Perkebunan Indonesia 2018-2020: Kelapa*. Jakarta (ID): Sekretariat Direktorat Jenderal Perkebunan, Direktorat Jenderal Perkebunan, Kementerian Pertanian.
- Ewansiha CJ, Ebhoaye JE, Asia IO, Ekebafé LO, Ehigie C. 2012. Proximate and mineral composition of coconut (*Cocos nucifera*) shell. *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology*. 13 (1): 57-60.
- Fogliatti DP, Kempainen SA, Kalnes TN, Fan J, Shonnard DR. 2014. life cycle carbon footprint of linear alkylbenzenesulfonate from coconut oil, palm kernel oil, and petroleum-based paraffins. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2: 1828-1834.
- Gabi. 2010. Handbook for Life Cycle Assessment (LCA) Using the GaBi Education Software Package. Leinfelden-Echterdingen (DE): PE International.
- Gunasekaran K, Annadurai R, Kumar P. 2012. Long term study on compressive and bond strength of coconut shell aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 28 (1): 208-215.
- [FAO] Food and Agricultural Organization. 2020. Crops. Diakses pada: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2: Energy.
- Jahirul M, Rasul M, Chowdhury A, Ashwath N. 2012. Biofuels production through biomass pyrolysis – A technological review. *Energies*. 5: 4952–5001.
- Kementerian ESDM (Energi dan Sumber Daya Mineral). 2019. Faktor Emisi GRK Sistem Ketenagalistrikan Tahun 2019. Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan.
- Klopper W dan Grhal B. 2014. Life Cycle Assesment: A Guide to Best Practice. Weinheim (DE): Wiley-VCH Verlag&Co.
- Menon R. 2014. Carbon Footprint: Producing it for a Better Tomorrow. India (IN): The Energy and Resources Institute.
- Naohiro G, Ulhasanah N, Kamahara H, Hasanudin U, Tachibana R, Fujie K. 2015. Chapter 9 - Material and Energy Flow Analysis. In book: Sustainability Assessment of Renewables-Based Products: Methods and Case Studies.
- Oetomo, Marga S, Sjafruddin, Santoso. 2006. Kajian instrument pungutan bagi pengguna jalan untuk dana pemeliharaan di Provinsi Jawa Barat. *Jurnal Teknik Sipil*. 13 (1): 41-53.
- [PERPAKI] Perkumpulan Pengusaha Arang Kelapa Indonesia. 2018. Tahun 2032 Industri Briket Batok Kelapa Indonesia Terancam Punah. [Internet]. Tersedia pada: <https://aktual.com/tahun-2032-industri-briket-batok-kelapa-indonesia-terancam-punah/>
- Rasi AJL, Seda YP, Anggraini SPA. 2017. Potensi teknologi asap cair tempurung kelapa terhadap keamanan pangan. *Jurnal Penelitian Teknik Sipil dan Teknik Kimia*. 1 (1): 1-10.
- Setyorini SA. 2019. Emisi gas rumah kaca pada produksi *virgin coconut oil* dengan pendekatan *life cycle assessment* [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Shelke AS, Ninghot KR, Kunjekar PP, Gaikwad SP. 2014. Coconut shell as partial replacement for coarse aggregate: review. *International Journal of Civil Engineering Research*. 5 (3): 211-214.
- Singh I, Singh I, dan Singh S. 2020. Utilization of Coconut Shell as a Partial Replacement of Coarse Aggregate: A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 7 (7): 2574-2578.
- Sreejith CC, Muraleedharan C, dan Arun P. 2013. Life cycle assessment of producer gas derived from coconut shell and its comparison with coal gas: an Indian perspective. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 4 (8): 1-22.
- Sukoyo M, Ridhuan K, dan Dharma US. 2020. Karakteristik biopellet tempurung kelapa dan serbuk kayu sebagai bahan bakar alternatif. *Jurnal Armatur*. 1 (1): 8-16.
- Sulaeman A, Dungani R, Islam MN, Khalil HPSA, Sumaradi I, Hermawan D, Hidayane A. 2016. Preliminary study of characterization of nanoparticles from coconut shell as filler agent in composites materials. *Journal of Material Science*. 1 (2016): 1-9.
- Sulistyo B, Nugroho R, dan Prihantoro R. 2019. The utilization of coconut shell waste as the helmet coating materials for motorcycle riders. *Journal of Physics: Conference Series*. 1273 (2019): 1-7.
- Supraptiningsih LK. 2020. Pengolahan limbah asap hasil pembakaran arang batok kelapa menjadi *liquid smoke* untuk bahan pengawet alami ikan asap di kota Probolinggo. *Jurnal Pengabdian Masyarakat*. 4: 24-33.

- Suprihatin, Nugroho AW, Suparno O, Saron. 2015. Life cycle assessment of integrated palm oil industry with scenarios of liquid and solid wastes utilization and integration with cattle farm. *Proceedings The 5th Environmental Technology and Management Conference - Green Technology towards Sustainable Environment*. Bandung, Indonesia, 23-24 November 2015.
- Tabata T. 2018. Chapter 26 - Environmental Impacts of Utilizing Woody Biomass for Energy: A Case Study in Japan. *Waste Biorefinery*.751-778.
- Ting TL, Jaya RP, Hassan NA, Yaacob H, Jayanti DS, Ariffin MAM. 2016. A review of chemical and physical properties of coconut shell in asphalt mixture. *Sciences and Engineering*. 78 (4): 85-89.
- Tirono M dan Sabit A. 2011. Efek suhu pada proses pengurangan terhadap nilai kalor arang tempurung kelapa (*coconut shell charcoal*). *Jurnal Neutrino*. 3 (2): 143-152.
- Wiloso EI, Nazir N, Hanafi J, Siregar K, Harsono SS, Setiawan AAR, Muryanto, Romli M, Utama NA, Shantiko B, Jupesta J, Utomo THA, Sari AA, Saputra SY, Fang K. 2018. Life cycle assessment research and application in Indonesia. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Germany (DE): Springer-Verlag GmbH.
- Winarno FG. 2014. *Kelapa Pohon Kehidupan*. Jakarta (ID): PT Gramedia Pustaka Utama.
- Winnipeg. 2012. Emission factors in kg CO<sub>2</sub>-equivalent per unit (Energy: Heat: Organic Combustible: Biomass).
- Yuliansyah A. 2019. Emisi Gas Rumah Kaca pada Produksi Asap Cair Tempurung Kelapa dengan Pendekatan *Life Cycle Assessment*. [Skripsi]. Bogor (ID): IPB University.