

**PRODUKSI DAN KARAKTERISASI ARANG DARI TANDAN KOSONG
KELAPA SAWIT DAN KAYU KARET**

(Skripsi)

**VIVI NURKHOLIFAH
1614151060**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2020**

ABSTRAK

PRODUKSI DAN KARAKTERISASI ARANG DARI TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DAN KAYU KARET

Oleh

VIVI NURKHOLIFAH

Kebutuhan energi di Indonesia yang terus meningkat dan ketersediaan bahan bakar yang semakin menurun, memaksa masyarakat untuk mencari sumber bahan bakar alternatif yang dapat diperbarui dan ramah lingkungan. Sumber bahan bakar dari biomassa seperti limbah pertanian berupa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan limbah kehutanan berupa kayu karet, memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai sumber energi terbarukan. Salah satu teknologi konversi biomassa limbah untuk meningkatkan kualitas bioenergi pada arang ialah melalui proses pirolisis. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui sifat bioenergi dan karakteristik kimia arang TKKS dan kayu karet yang diproduksi dengan menggunakan teknologi pirolisis pada suhu 400°C dan 600°C. Hasil penelitian menunjukkan rendemen arang TKKS sebesar 19,04% dengan nilai rasio densifikasi energi (RDE) 1,57 dan rendemen energi (EY) 29,81% pada suhu 400°C, dan 15,88% pada suhu 600°C, RDE sebesar 1,52 dan nilai YE sebesar 24,15%. Rendemen Arang kayu karet sekitar 32,00% dengan nilai RDE sebesar 1,49 dan YE sebesar 47,76%. Nilai pH arang yang paling tinggi diperoleh arang TKKS dari kedua suhu yang berkisar antara 8,8 – 9,4, dan untuk perubahan gugus fungsi dari arang TKKS dan kayu karet yaitu C=O, C=C, C-H, O-H, dimana gugus fungsi mengalami perubahan pada pita spektrum. Hasil dari pengaruh suhu terhadap sifat bioenergi arang TKKS dan kayu karet ialah hasil yang baik ada pada perlakuan suhu 600°C karena sudah memenuhi persyaratan SNI.

Kata kunci: limbah, pirolisis, arang, tandan kosong kelapa sawit, kayu karet, karakteristik kimia, sifat bioenergi.

ABSTRACT

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF CHARCOALS FROM PALM OIL EMPTY FRUIT BUNCHES AND RUBBER WOOD

By

VIVI NURKHOLIFAH

Energy demand in Indonesia that continues to increase and the availability of fuel that kept decreasing, forcing people to look for alternative sources of renewable and environmentally friendly fuels. Sources of fuel from biomass, such as agricultural waste in the form of palm oil empty fruit bunches (EFB) and forestry waste in the form of rubber wood, have the potential to be developed as a source of renewable energy. One of the waste biomass conversion technologies to improve the quality of bioenergy in charcoal is through the pyrolysis process. The purpose of this study was to determine the bioenergy and chemical characteristics of charcoal using pyrolysis technology with temperature variables of 400°C and 600°C. The results showed the yield produced from the production process for EFB charcoal was 19,04% with an RDE value of 1.57 and EY 29,81% at 400°C, while at 600°C, char yield was 15,88%, RDE 1,52, and YE 24.15%. Char yield of rubber wood was 32,00%, with RDE values of 1.49 and YE of 47,76%. The highest pH value of EFB charcoal obtained from both temperatures were ranging from 8,8-9,4, and for changes in the functional groups of EFB charcoal and rubber wood, namely C=O, C=C, CH, OH, where the functional group changes in the spectrum band. The result of the effect of temperature on the bioenergy properties of EFB charcoal and rubber wood is a good result at a temperature treatment of 600°C because it meets the SNI requirements.

Keywords: waste, pyrolysis, charcoal, oil palm empty bunches, rubber wood, chemical characteristics, bioenergy properties.

**PRODUKSI DAN KARAKTERISASI ARANG DARI TANDAN KOSONG
KELAPA SAWIT DAN KAYU KARET**

oleh

VIVI NURKHOLIFAH

Skripsi

**sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA KEHUTANAN**

**pada
Jurusan Kehutanan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2021**

Judul Skripsi : Produksi dan Karakterisasi Arang dari Tandan
Kosong Kelapa Sawit dan Kayu Karet

Nama Mahasiswa : Vivi Nurkholifah

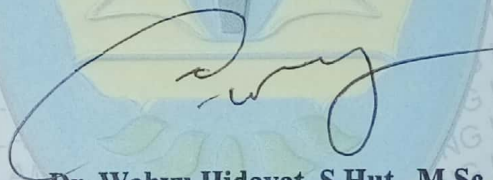
Nomor Pokok Mahasiswa : 1614151060

Program Studi : Kehutanan

Fakultas : Pertanian

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.
NIP 197911142009121001

2. Ketua Jurusan Kehutanan

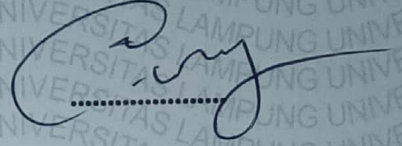


Dr. Indra Gumay F., S.Hut., M.Si.
NIP 197402222003121001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.



Penguji Bukan Pembimbing : Dr. Indra Gumay F., S.Hut., M.Si



Penguji Bukan Pembimbing : Dr. Melya Riniarti, S.P., M.Si.



2. Dekan Fakultas Pertanian



Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si.

FAKULTAS PERTANIAN
NIP. 196110201986031002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 09 Maret 2021

Surat pernyataan

Saya yang bertandatangan di bawah ini menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul "**Produksi Karakteristik Arang dari Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Kayu Karet**" merupakan hasil karya saya sendiridan bukan karya orang lain. Semua hasil yang tertuang dalam skripsi ini telah mengikuti kaidah penulisan karya ilmiah Universitas Lampung. Apabila dikemudian hari terbukti bahwa skripsi ini merupakan salinan atau dibuat orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan akademik yang berlaku.

Bandar Lampung, 21 Desember 2021



Vivi Nurkholifah

1614151060

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Sidowaluyo pada tanggal 18 Desember 1996, sebagai anak pertama dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Tukimin dan Ibu Suparni. Pada tahun 2009 penulis menyelesaikan pendidikan sekolah dasar di MI Mathla'ul Anwar Sidowaluyo, pada tahun 2012 penulis menyelesaikan pendidikan sekolah menengah pertama di Pondok Modern Darussalam Gontor Putri 1 Mantingan, Ngawi, Jawa Timur, dan pada tahun 2016 penulis menyelesaikan pendidikan sekolah menengah atas di SMA Negeri 1 Sidomulyo.

Pada tahun 2016, penulis diterima sebagai mahasiswa di Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN). Penulis melakukan kegiatan Praktik Umum Kehutanan (PU) di Kampus Lapangan Fakultas Kehutanan Universitas Gadjah Mada, Desa Getas, Kecamatan Kradenan, Kabupaten Blora, Provinsi Jawa Tengah pada bulan Agustus 2019, dan penulis juga sudah melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) yang bertepatan di Desa Gedung Aji Kecamatan Gedung Aji Kabupaten Tulang Bawang pada bulan Januari-Februari 2020.

Selama menjadi mahasiswa penulis merupakan anggota umum Himasyilva dan tergabung dalam UKM (Unit Kegiatan Mahasiswa) Taekwondo Unila, pada tahun 2020 penulis pernah menjadi Asisten Dosen Mata Kuliah Struktur dan Sifat-sifat Kayu dan penulis pernah mengikuti Seminar Nasional Konservasi 2020 sebagai pemateri dengan judul “Karakteristik Arang dari Limbah Kayu Karet (*Hevea brasiliensis*) dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis*)”.

Teruntuk Ayah, Mama, dan Adikku tercinta

“Sesungguhnya Allah tidak akan mengubah nasib suatu kaum hingga mereka mengubah diri mereka sendiri.”

(Q.S. Ar-Ra’d:11)

“Setiap apa yang kamu lakukan, benar atau salah pasti akan ada saja orang yang berusaha untuk mengomentarnya. Maka dari itu, kamu tak perlu risau dan lakukanlah apa pun yang kamu inginkan di dalam hidup ini.”

(BTS)

8. Kedua orangtua penulis yaitu Bapak Tukimin dan Ibu Suparni yang tidak pernah berhenti memberikan kasih sayang, doa, motivasi, arahan dengan penuh kesabaran hingga penulis bisa melangkah sejauh ini;
9. Adik-adik penulis yaitu Dinda Nur Habibah dan Muhammad Dimas Hafidz Muzaki yang selalu memberikan kasih sayang, doa, dan motivasi;
10. Teman seperjuangan kehutanan 2016 “T16ER” dan khususnya tim THH Tri Ismianto R.W., Muhammad Abdillah, Halim Hardianto, Ganang Bagus Akbar Prihastono, Reynaldo Zevan, Seldi Prayoga, Siti Mutiara dan Rahmi Adi B., atas segala bantuan, dukungan dan kebersamaan yang telah kalian berikan;
11. Sahabat penulis Ufara Qasrin dan Asha Ridhayana atas segala dukungan, saran, dan kebersamaan yang telah kalian berikan;
12. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu yang telah banyak membantu dalam proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini selesai.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, akan tetapi penulis berharap semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi para pembaca.

Bandar Lampung, Agustus 2021

Penulis

Vivi Nurkholifah

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang dan Masalah.....	1
1.2 Tujuan.....	5
1.3 Kerangka Pemikiran.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Limbah.....	7
2.2 Kelapa Sawit.....	9
2.2.1 Limbah Kelapa Sawit.....	10
2.3 Kayu Karet.....	12
2.4 Pirolisis.....	14
2.5 Arang.....	15
III. METODE PENELITIAN	17
3.1 Waktu dan Tempat.....	17
3.2 Alat dan Bahan.....	17
3.3 Batasan Penelitian.....	17
3.4 Metode Penelitian.....	18
3.4.1 Tahapan Preparasi.....	18
3.4.2 Pembuatan Arang.....	18
3.4.3 Pengujian Arang Hayati.....	20
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	24
4.1 Rendemen.....	24
4.2 Nilai kalor.....	25
4.3 Rasio Densifikasi Energi dan Rendemen Energi.....	26
4.4 Nilai pH.....	27
4.5 Analisis Proksimat.....	28
4.6 Analisis <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR).....	31
V. SIMPULAN DAN SARAN	34
5.1 Simpulan.....	34
5.2 Saran.....	35
DAFTAR PUSTAKA	36

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Luas Perkebunan Kelapa Sawit Beberapa Provinsi di Indonesia.....	10
2. Komposisi Kimia Tandan Kosong Kelapa Sawit.....	11
3. Luas Perkebunan Karet Beberapa Provinsi Di Indonesia.....	13
4. Komposisi Kimia Kayu Karet.....	14
5. Efek Suhu Terhadap Pirolisis Arang.....	16
6. Rendemen Arang Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Kayu Karet.....	24
7. Rasio Densifikasi Energi Arang Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Kayu Karet.....	38
8. Hasil Analisis Proksimat Arang TKKS dan Kayu Karet (%).....	29
9. Perubahan Gugus Fungsi Arang TKKS dan Kayu Karet.....	32

|

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pemikiran penelitian.....	6
2. Tungku kubah pembuatan arang hayati di PT Kendi Arindo Lampung	20
3. Skema <i>bomb calorimeter</i>	21
4. Grafik nilai kalor arang tandan kosong kelapa sawit dan kayu karet...	25
5. Grafik nilai pH arang tandan kosong kelapa sawit dan kayu karet.....	27
6. Spektrum FTIR arang tandan kosong kelapa sawit dan kayu karet.....	32

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang dan Masalah

Indonesia merupakan negara tropis yang kaya akan sumber energi biomassa. Biomassa adalah bahan-bahan organik yang berasal dari hewan, tumbuhan, produk, dan limbah industri budidaya (pertanian, perkebunan, kehutanan, peternakan dan perikanan) (Haryanto *et al.*, 2021a). Limbah merupakan bahan sisa yang dihasilkan dari suatu kegiatan dan proses produksi, baik pada skala rumah tangga, industri, pertambangan, dan sebagainya (Heny *et al.*, 2020). Limbah dibagi menjadi dua berdasarkan sifatnya, yaitu limbah organik dan limbah anorganik. Limbah organik merupakan limbah yang dapat diuraikan secara sempurna melalui proses biologi baik aerob maupun anaerob, sedangkan limbah anorganik merupakan limbah yang tidak dapat diuraikan melalui proses biologi (Latifa, 2011; Warlina *et al.*, 2013).

Limbah merupakan buangan yang dihasilkan dari suatu proses produksi baik industri maupun rumah tangga. Limbah yang dihasilkan dari kegiatan produksi industri pada umumnya berbentuk bahan-bahan organik yang berasal dari sektor pertanian maupun kehutanan (Haryanto *et al.*, 2021a; Hidayat *et al.*, 2020a). Jumlah limbah dari sektor ini sangatlah melimpah. Namun penanganan dan pengendalian limbah masih menjadi masalah utama untuk dihadapi oleh pembangunan industri seperti industri hasil pertanian (Haryanto *et al.*, 2021b; Hidayat *et al.*, 2020b; Yulianto *et al.*, 2020).

Limbah dari sektor pertanian adalah semua bagian tanaman pertanian mulai dari atas tanah atau bagian pucuk, batang yang tersisa setelah proses pemanenan atau diambil hasil utamanya (Haryanto *et al.*, 2021a). Salah satu contoh limbah industri pertanian yang digunakan dalam penelitian ini yaitu limbah dari industri kelapa sawit (*Elaeis guineensis*). Proses pengolahan kelapa sawit menghasilkan berbagai macam limbah yang dapat dikelompokkan

diantaranya menjadi limbah cair, limbah padat, dan limbah gas (Iryani *et al.*, 2019). Menurut Syamsiro (2016), untuk 1 ton tandan buah segar kelapa sawit akan menghasilkan limbah berupa tandan kosong kelapa sawit sebanyak 23%, cangkang (*shell*) 6,5%, lumpur sawit (*wet decanter solid*) sebanyak 4%, limbah serabut (*fiber*) 13% dan limbah cair sebanyak 15%. Limbah padat tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan limbah padat yang dihasilkan dalam jumlah yang cukup besar sekitar 126.317,54 ton/tahun (Syamsiro, 2016). Selain limbah dari sektor pertanian, terdapat juga sektor lain yang menghasilkan limbah yaitu sektor kehutanan. Komoditi utama dari sektor ini salah satunya yaitu kayu.

Kayu merupakan sumber daya hayati yang sangat sering digunakan untuk keperluan manusia di antaranya sebagai bahan bakar, kerajinan, furnitur, hingga bahan untuk bangunan (Febrianto *et al.*, 2017; Hidayat *et al.*, 2016; Lestari, 2017). Pasokan kayu di Indonesia dari hutan alam memiliki perbedaan yang signifikan jika dibandingkan dengan hutan tanaman (Harum *et al.*, 2019; Hidayat *et al.*, 2017b; Kim *et al.*, 2021., Hernawati, 2015). Total produksi kayu hutan alam pada tahun 2019 berjumlah 6,77 juta m³, sedangkan produksi kayu dari hutan tanaman berjumlah 36,23 juta m³, ini membuktikan bahwa pemanfaatan kayu oleh perusahaan dari hutan tanaman lebih tinggi dari hutan alam (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2019).

Limbah kayu dapat dibagi menjadi dua golongan yaitu, limbah kayu dari kegiatan pemanenan hasil hutan dan industri pengolahan kayu. Limbah pemanenan hasil kayu terdiri dari ranting, tunggak dan bagian atas cabang pertama pohon, dan daun (Soenarno *et al.*, 2018). Limbah kayu yang berasal dari industri pengolahan kayu antara lain berupa lembaran finis rusak, *log end* (pangkal kayu bulat), sisa kupasan, serbuk gergajian, serbuk pengamplasan, potongan dari kayu gergajian, dan kulit (Arsad, 2014).

Limbah pemanenan terutama terjadi di dua tempat yaitu terjadi di petak tebang akibat proses penebangan (*felling*), pembagian batang (*bucking*), dan kondisi batang pohon (Soenarno *et al.*, 2016), dan juga terjadi di tempat pengumpulan kayu sementara (TPn) akibat pemotongan setelah dilakukan pengujian dan pengukuran (*grading* dan *scaling*) kayu bulat. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. P.1 tahun 2019 menyebutkan tentang izin

industri primer hasil hutan menyebutkan di dalamnya bahwa limbah pemanenan adalah semua jenis kayu sisa pembagian batang berupa tunggak, kayu cacat/busuk hati/gerowong dengan besaran residunya di atas 40% cabang, ranting yang tertinggal di hutan.

Priyanto (2012) menyatakan bahwa industri pengolahan kayu yang pertama kali ada di Indonesia ialah industri penggergajian. Seiring berjalannya waktu, teknologi yang digunakan untuk pengolahan pun ikut berkembang. Menurut Rachma dan Malik (2011), setiap kegiatan penggergajian akan menghasilkan limbah, limbah penggergajian adalah potongan kayu dalam bentuk dan ukuran tertentu yang seharusnya masih bisa dimanfaatkan tetapi ditinggalkan karena keterbatasan teknologi, dengan kata lain penggergajian merupakan produk sampingan dari suatu proses penggergajian yang dapat dimanfaatkan bila teknologinya telah tersedia. Rachma dan Malik (2011) menyebutkan bahwa komposisi bentuk limbah penggergajian dapat dibagi menjadi tiga bagian yaitu serbuk gergaji dengan persentase 12-15 %, sebetan dan potongan ujung kayu berukuran kayu memiliki persentase yang tinggi yaitu sebesar 25-35%, dan yang terakhir potongan dolok (potongan kayu yang belum dibelah) dan cacat kayu dengan persentase 5-10%. Limbah-limbah ini memiliki potensi sebagai sumber energi terbarukan.

Salah satu solusi untuk mengurangi permasalahan timbunan limbah dari berbagai kegiatan industri kehutanan dan pertanian, penelitian ini memanfaatkan limbah sebagai material karbon dengan menggunakan metode pirolisis. Pirolisis adalah dekomposisi kimia bahan organik melalui proses pemanasan tanpa atau sedikit oksigen atau reagen lainnya, metode ini dilakukan di dalam sebuah reaktor pengurangan atmosfer (hampa udara) dengan menggunakan temperatur hingga 800°C (Ramadhan, 2013). Produk yang dihasilkan dari metode pirolisis diantaranya yaitu asap, tar, *char*, arang hayati (*biochar*), arang aktif, briket arang, dan lainnya (Komarayati dan Pari, 2012). Metode pirolisis dalam penelitian ini menggunakan tungku komersial yang akan menghasilkan arang yang cukup banyak dalam sekali produksi.

Uriya (2019) mengemukakan arang merupakan residu hitam yang berisi karbon tidak murni yang dihasilkan dengan menghilangkan kandungan air dan

komponen volatil dari hewan ataupun tumbuhan. Arang umumnya didapatkan dengan memanaskan kayu dan benda lainnya, arang yang hitam, ringan, mudah hancur dan menyerupai batu bara memiliki terdiri dari 85-98% karbon dan sisa dari itu merupakan abu atau benda kimia lainnya. Arang biasanya dimanfaatkan sebagai media tanam bagi tanaman karena kelebihan yang dimiliki oleh arang tersebut (Agustin *et al.*, 2014), akan tetapi dalam penelitian ini arang digunakan sebagai sumber energi untuk penghasil panas. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Pari *et al.* (2012) yang menyatakan bahwa arang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi penghasil panas, dan juga Indonesia merupakan sebagai produsen nomor 1 dari 5 negara pengeksport arang ekspor di pasar dunia, yang di antaranya China, Malaysia, Afrika Selatan, dan Argentina.

Contoh manfaat arang digunakan sebagai sumber energi yaitu sebagai bahan bakar pengganti minyak dan kayu bakar, dan yang lebih banyak digunakan sebagai bahan baku arang briket. Rumiyantri *et al.* (2018) melaporkan potensi penggunaan arang sebagai bahan baku pembuatan briket arang sebagai sumber energi alternatif. Elsapriki *et al.* (2018) menyatakan bahwa kualitas arang yang terdiri dari nilai kalor, kadar air, dan nilai kadar zat terbang dalam metode pirolisis dari limbah kayu sudah memenuhi standar SNI 01-6235-2000 (Badan Standar Nasional, 2000).

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dilakukanlah penelitian pembuatan arang dengan proses pirolisis yang menggunakan dua suhu yaitu suhu 400°C dan 600°C. Penelitian ini memanfaatkan limbah industri pertanian berupa limbah tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan baku pembuatan arang. Sebagai pembandingan, arang juga diproduksi menggunakan limbah kehutanan berupa limbah penggergajian kayu karet. Variasi tersebut dilakukan untuk mengetahui sifat fisis dari arang yang meliputi rendemen, rasio densifikasi energi, pH, dan perubahan gugus fungsi kimia.

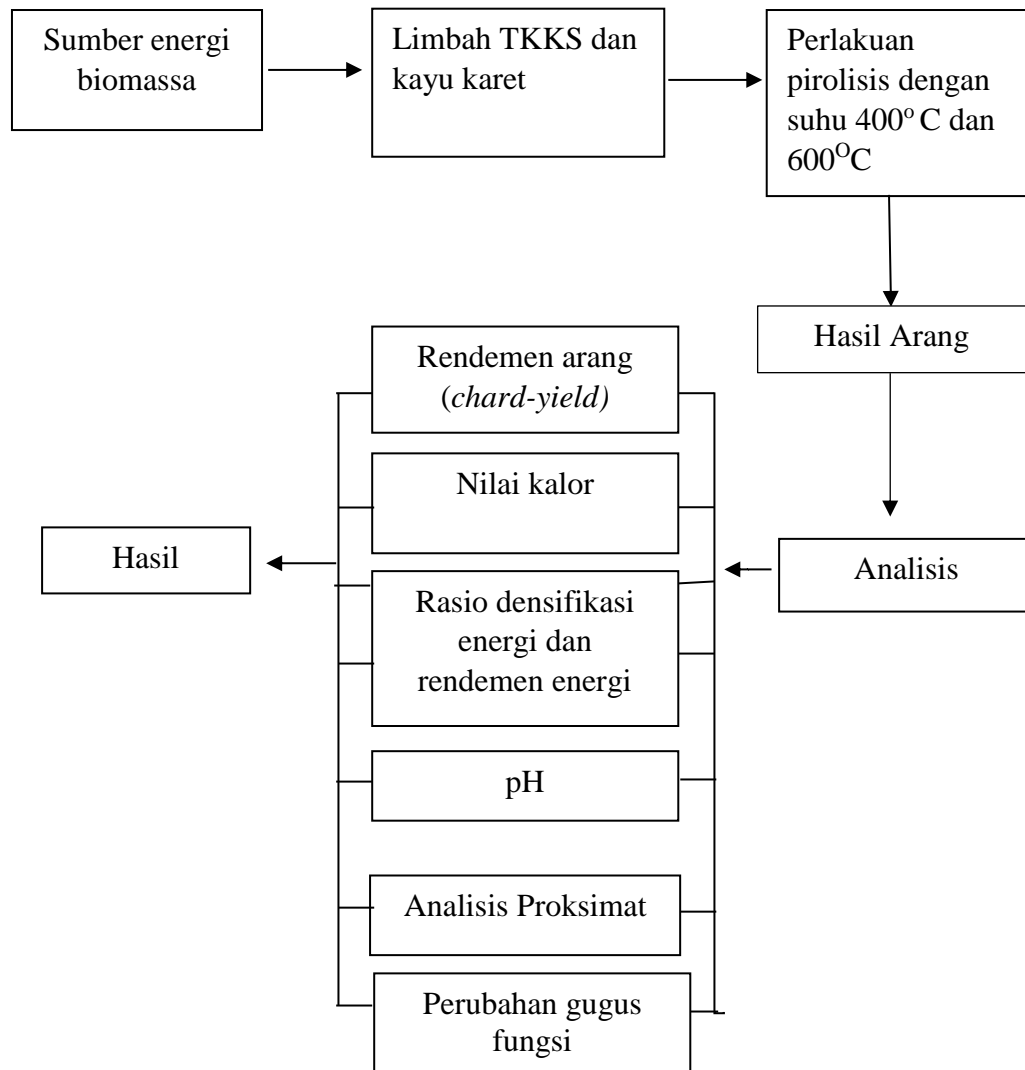
1.2 Tujuan

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui nilai rendemen produksi arang TKKS dan kayu karet yang dihasilkan dengan menggunakan kilang tradisional.
2. Mengetahui karakteristik kimia dari arang TKKS dan kayu karet yang diproduksi dengan menggunakan kilang tradisional.
3. Mengetahui pengaruh suhu terhadap sifat bioenergi arang TKKS dan kayu karet.

1.3 Kerangka Pemikiran

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki industri pengolahan kayu yang cukup banyak. Hasil akhir dari industri penggergajian kayu adalah limbah industri yang berupa serpihan dan serbuk kayu yang menumpuk dan kurang dimanfaatkan sehingga dapat menyebabkan pencemaran (Arsad, 2014). Industri penggergajian kayu rata-rata menghasilkan limbah sebesar 40,48% volume yang terdiri dari sebetan (22,32%), potongan kayu (9,39%), dan serbuk gergaji (8,77%) (Aisyah, 2019). Limbah kelapa sawit merupakan suatu hasil samping dari industri kelapa sawit meliputi tandan sawit, serabut sawit, dan cangkang kelapa sawit (Iryani *et al.*, 2019). Menurut Shobar *et al.* (2020) untuk dapat memanfaatkan limbah TKKS dan kayu karet sebagai energi alternatif maka diperlukan perlakuan pengubahan bentuk limbah tersebut menjadi arang dan dilakukan perlakuan tambahan dengan melakukan perlakuan pirolisis terhadap arang tersebut.



Gambar 1. Kerangka pemikiran.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah

Limbah diartikan sebagai bahan buangan yang kehadirannya pada suatu saat dan tempat tertentu tidak dikehendaki lingkungan karena tidak memiliki nilai ekonomis (Elsaprike *et al.*, 2018). Menurut Iryani *et al.*, (2019) bentuk limbah yang dihasilkan dalam suatu industri dapat dibagi menjadi 3 di antaranya:

1. Limbah padat

Limbah padat secara garis besar diartikan menjadi limbah padat yang mudah terbakar, limbah yang tidak mudah terbakar, mudah membusuk, debu, lumpur, dan yang dapat di daur ulang. Contoh limbah padat ialah limbah hasil pertanian, hasil perkebunan kelapa sawit, limbah kegiatan kehutanan dan sebagainya.

2. Limbah cair

Limbah cair ialah limbah yang berwujud cair. Limbah cair dapat terlarut dalam air, selalu berpindah, contoh limbah cair adalah bahan kimia, hasil pelarut, air bekas produksi oli bekas, dan lainnya.

3. Limbah gas

Limbah gas ialah limbah yang berwujud gas, udara di atmosfer tidak pernah di temukan dalam keadaan bersih melainkan sudah tercampur dengan gas-gas yang tidak diperlukan. Contoh bahan pencemar yang sering ditemukan yaitu karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), sulfur dioksida (SO₂), dan sebagainya.

Limbah dari sektor pertanian adalah semua bagian tanaman pertanian dimulai dari atas tanah sampai bagian pucuk yang tersisa setelah proses pemanenan atau diambil hasil utamanya (Haryanto *et al.*, 2021a). Salah satu contoh limbah industri pertanian khususnya industri kelapa sawit, saat proses pengolahan kelapa sawit

menghasilkan berbagai limbah yang dapat dikelompokkan menjadi limbah cair, limbah padat, dan limbah gas (Iryani *et al.*, 2019).

Mandiri (2012) menyatakan bahwa untuk 1 ton kelapa sawit akan menghasilkan limbah berupa tandan kosong kelapa sawit sebanyak 23%, cangkang (*shell*) 6,5%, lumpur sawit (*wet decanter solid*) sebanyak 4%, limbah serabut (*fiber*) 13% dan limbah cair sebanyak 15%. Limbah padat TKKS (tandan kosong kelapa sawit) merupakan limbah padat yang dihasilkan dalam jumlah yang cukup besar sekitar 126.317,54 ton/tahun (Haryanti *et al.*, 2014).

Kayu merupakan sumber daya hayati yang sangat sering digunakan untuk keperluan manusia diantaranya sebagai bahan bakar, kerajinan, furnitur, hingga bahan untuk bangunan (Lestari, 2017). Limbah kayu dapat dibagi menjadi dua golongan yaitu, limbah kayu yang terjadi pada kegiatan eksploitasi hutan berupa pohon tebang yang terdiri dari batang pohon sampai cabang, tunggak dan bagian atas cabang pertama pohon, dan limbah kayu yang berasal dari industri pengolahan kayu antara lain berupa lembaran vinir rusak, *log end* (pangkal kayu bulat, atau kayu penghara yang tidak berkualitas, sisa kupasan, serbuk gergajian, serbuk pengamplasan, potongan dari kayu gergajian dan kulit (Arsad, 2014).

Menurut Rachma dan Malik (2011), setiap kegiatan pembalakan maupun penggergajian menghasilkan limbah, limbah penggergajian adalah potongan kayu dalam bentuk dan ukuran tertentu yang seharusnya masih bisa dimanfaatkan tetapi di tinggalkan karena keterbatasan teknologi, dengan kata lain penggergajian merupakan produk sampingan dari suatu proses penggergajian yang dapat dimanfaatkan bila teknologinya telah tersedia. Rachma dan Malik (2011) menyebutkan bahwa komposisi bentuk limbah penggergajian dapat dibagi menjadi tiga bagian yaitu serbuk gergaji dengan persentase 12-15%, sebetan dan potongan ujung kayu berukuran kayu memiliki persentase yang tinggi yaitu sebesar 25-35%, dan yang terakhir potongan dolok dan cacat kayu dengan persentase 5-10%.

2.2 Kelapa Sawit

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) adalah tumbuhan tropis yang berasal dari Afrika Barat. Tanaman ini dapat tumbuh di luar daerah asalnya, seperti Indonesia. Tanaman kelapa sawit memiliki arti penting dalam pembangunan nasional (Duryat *et al.*, 2013; Haryanto *et al.*, 2021b). Tanaman kelapa sawit dalam taksonomi tumbuhan tersusun dalam sistematika sebagai berikut :

Kingdom : Plantae

Sub kingdom : Viridiplantae

Divisi : Tracheophytina

Kelas : Magnoliopsida

Ordo : Arecales

Genus : *Elaeis*

Spesies : *Elaeis guineensis Jacq.*

Secara umum waktu tumbuh rata-rata 20 – 25 tahun, buah yang bermutu akan menghasilkan 22% minyak kelapa sawit. Tanaman ini memiliki beberapa periode usia yang pertama yaitu berada pada tiga tahun pertama disebut sebagai kelapa sawit muda, pada usia tujuh sampai sepuluh tahun disebut sebagai periode matang, di saat periode tersebut mulai menghasilkan tandan buah segar (TBS), saat usia sebelas sampai dua puluh tahun sudah mulai mengalami penurunan dalam produksi (Rahayu *et al.*, 2016).

Syarat tumbuh tanaman kelapa sawit untuk ketinggian yang cocok sekitar antara 0-500 m dpl, memiliki curah hujan sekitar 2.000 – 2.500 mm/tahun, suhu optimum sekitar 29 – 30°C, untuk intensitas cahaya yang baik sekitar 5-7 jam/hari, dan kelembaban ideal sekitar 80 – 90%. Tanaman ini juga menghendaki tanah yang gembur, subur, datar, berdrainase baik, dan memiliki pH tanah yang optimum antar 5,0 – 5,5 (Arsyad, 2012).

Menurut Harahap (2011), luas areal kebun kelapa sawit mengalami peningkatan setiap tahunnya, maka produksi pun meningkat sampai 9,4% pertahunnya, pada tahun 2011 produksi CPO (*crude palm oil*) diperkirakan akan meningkat antara 5-6% sedangkan pada periode 2010 -2020 pertumbuhan produksi diperkirakan berkisar 2 – 4% dikarenakan perbanyakan kelapa sawit yang masih dilakukan sampai sekarang yaitu dengan cara generatif (menggunakan

biji). Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (2019), luas perkebunan kelapa sawit Indonesia di tahun 2019 mencapai 14.724,60 ribu ha, dan untuk luas perkebunan di provinsi Lampung mencapai 203,70 ribu ha. Sebaran luas kelapa sawit dari tahun 2017 – 2019 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Luas Perkebunan Kelapa Sawit Beberapa Provinsi di Indonesia

Provinsi	Luas Tanaman Kelapa Sawit Menurut Provinsi (Ribu Hektar)		
	2019	2018	2017
Aceh	500,10	494,20	440,30
Sumatera Utara	1.601,90	1.551,60	1.461,20
Sumatera Barat	384,50	379,60	397,50
Riau	2.808,70	2.706,90	2.209,60
Jambi	1.070,70	1.032,10	768,00
Sumatera Selatan	1.178,10	1.137,60	1.032,80
Bengkulu	314,50	311,80	339,80
Lampung	203,70	201,60	242,30

Sumber: Badan Pusat Statistik (2019).

2.2.1 Limbah Kelapa Sawit

Limbah perkebunan kelapa sawit ialah sisa hasil tanaman kelapa sawit yang tidak termasuk dalam produk utama atau yang tertinggal pada saat pembukaan areal perkebunan, peremajaan, dan pemanenan kelapa sawit. Jenis limbah dalam perkebunan ini antara lain pelepah daun dan gulma. Limbah dari pelepah daun dalam bobot kering bisa menghasilkan 10,4 ton/ha dalam setahunnya (Kasnawati, 2011).

Dalam pengelolaan industri kelapa sawit untuk menjadi minyak sawit juga akan menghasilkan limbah. Tanaman ini merupakan tanaman perkebunan yang memegang peran penting dalam industri pangan karena hasil utama pengolahan kelapa sawit adalah menjadi minyak sawit, dalam pengolahannya selain hasil utama terdapat juga beberapa jenis limbah yang di hasilkan yaitu limbah padat, limbah cair, dan juga limbah gas (Iryani *et al.*, 2019).

a. Limbah cair

Limbah cair dalam industri ini didapat dari proses pengolahan kelapa sawit, yang berasal dari proses kondensat (pengukusan), stasiun klarifikasi, dan air buangan dari hidrosiklon dan air pencucian pabrik (Kardila dan Vaine 2011).

b. Limbah Gas

Dalam pengolahan kelapa sawit terdapat juga limbah berupa gas yaitu limbah udara buangan yang berasal dari pembakaran *generating set* dan tandan kosong dan cangkang sawit di *incinerator* (Kardila dan Vaine 2011).

c. Limbah Padat

Selain limbah cair dan gas dalam pengolahan industri kelapa sawit terdapat juga limbah padat, limbah yang dihasilkan berupa tandan kosong kelapa sawit, cangkang kelapa sawit, dan serabut yang mempunyai ciri khas pada komposisinya (Kardila dan Vaine 2011).

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan limbah padat dari pabrik kelapa sawit yang belum dimanfaatkan secara optimal, limbah ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam pupuk organik maupun yang lainnya (Hartanto *et al.*, 2021b). TKKS juga memiliki komposisi kimia yang dapat dilihat di Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi Kimia Tandan Kosong Kelapa Sawit

Komposisi	Kadar (%)
Kadar air	5,47
Lignin	26,49
Hemiselulosa	26
Selulosa	48,56
Kadar abu	14,95

Sumber: Artika *et al.* (2019); Rani *et al.* (2020).

Pemanfaatan TKKS masih sangat terbatas, limbah ini belum dimanfaatkan secara baik oleh sebagian besar masyarakat Indonesia masih membakar TKKS dalam pembakaran, meskipun cara ini sudah dilarang oleh pemerintah (Hartono *et al.*, 2016; Hartono *et al.*, 2019). Menurut Syamsiro (2016), alternatif pengolahan lainnya adalah dengan menimbun, dijadikan bahan bakar atau diolah menjadi kompos. Solusi untuk mengatasi masalah limbah tandan kosong kelapa sawit

yaitu dengan pemanfaatan tandan kosong kelapa sawit menjadikan dan meningkatkan nilai ekologi dan ekonomi yang tinggi (Refqi *et al.*, 2013).

2.3 Kayu Karet

Karet (*Hevea brasiliensis*) merupakan tanaman yang berasal dari negara Brazil, dan tanaman ini merupakan sumber utama untuk bahan tanaman karet alam dunia. Pohon karet merupakan tanaman penghasil lateks yang dapat dikatakan satu-satunya tanaman yang dibeunkan secara besar-besaran (Budiman, 2012).

Menurut Badan Pusat Statistik (2018), luas lahan perkebunan karet di Indonesia pada tahun 2018 sebesar 3.549.044 ha yang diperkirakan mampu menyediakan kayu Karet sebesar 37.368 m³/tahun dan memproduksi lateks mencapai 3.524.131 ton/ha (Kemenperin, 2018). Tanaman karet memiliki umur ekonomis sekitar 25-30 tahun, karet berpotensi menghasilkan kayu pada akhir masa sadapnya yang merupakan salah satu biomassa potensial dengan kandungan lignoselulosa yang cukup tinggi (Rubiyanti *et al.*, 2019).

Budiman (2012) menyatakan taksonomi tanaman karet memiliki sistem klasifikasi sebagai berikut :

Kingdom	: <i>Plantae</i> (tumbuh-tumbuhan)
Devisi	: Spermatophyte
Sub divisi	: Angiospermae
Kelas	: Dicotyledonae
Ordo	: Euphorbiales
Family	: Euphorbiaceae
Genus	: <i>Hevea</i>
Spesies	: <i>Hevea brasiliensis muell. Arg.</i>

Syarat tumbuh tanaman karet yang baik pada saat kondisi iklim yaitu dengan suhu rata-rata harian 28°C (kisaran 25° - 35°C), dengan curah hujan tahunan rata-rata antara 2.500 – 4.000 mm dengan hari hujan mencapai 150 hari/tahun, keadaan daerah yang sangat cocok untuk tanaman karet adalah daerah-daerah Indonesia bagian barat yaitu Sumatera, Jawa, dan Kalimantan. Tanaman karet sangat toleran terhadap keasaman tanah, karet dapat tumbuh pada kisaran

pH tanah 3,5 – 7,0 untuk pH yang optimum harus disesuaikan dengan jenis tanah yang akan di tanami oleh tanaman karet tersebut (Budiman, 2012).

Menurut data Badan Pusat Statistik (2019) luas areal tanaman karet pada tahun 2017 – 2018 meningkat 10% pertahunnya, luas areal tanaman karet di Indonesia pada tahun 2019 mencapai 3.683,50 ribu ha, sedangkan di Provinsi Lampung luas areal mencapai 172,50 ribu ha. Data luas tanaman karet dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Luas Perkebunan Karet Beberapa Provinsi di Indonesia

Provinsi	Luas Tanaman Karet Menurut Provinsi (Ribuan Hektar)		
	2019	2018	2017
Aceh	99,70	99,10	115,60
Sumatera Utara	409,10	408,30	449,50
Sumatera Barat	130,80	130,30	130,00
Riau	329,90	328,90	349,40
Jambi	390,70	389,80	378,00
Sumatera Selatan	861,60	858,40	837,60
Bengkulu	104,10	103,50	98,20
Lampung	172,50	168,10	157,00

Sumber: Badan Pusat Statistik (2019).

Matangaran (2012) menyatakan bahwa hasil dalam pemanenan kayu karet akan menghasilkan limbah, yaitu berupa ranting, daun, akar dan serta kayu karet yang tidak layak jual. Selain limbah dari pemanenan limbah kayu karet juga dihasilkan oleh industri penggergajian kayu, yang dimana menghasilkan limbah berupa sebetan, dan potongan dari bahan baku (Sutrisno, 2013). Kayu karet juga memiliki komposisi kimia di dalamnya, rata-rata kandungan kimia kayu Karet dari beberapa klon rekomendasi dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Komposisi Kimia Kayu Karet

Komposisi kimia	Persentase (%)
Holoseulosa	67,38
Selulosa	43,13
Lignin	20,78
Pentosa	17,54
Kelarutan dalam air Dingin	4,75
Kelarutan dalam air Panas	8,21
Kelarutan dalam NaOH 1%	14,69
Kelarutan dalam 1 : 2 Benzena Alkohol	4,58
Kadar abu	0,779
Kadar silika	0,193

Sumber : Boerhendhy *et al.*, (2010); Rubiyantiet *al.*, (2020).

2.4 Pirolisis

Pirolisis adalah dekomposisi kimia bahan organik melalui proses pemanasan tanpa atau sedikit oksigen atau reagen lainnya (Haryanto *et al.*, 2021 a). Metode ini dilakukan di dalam sebuah reaktor pengurangan atmosfer (hampa udara) dengan menggunakan temperatur hingga 800°C. Salah satu teknologi yang digunakan untuk mengatasi limbah yaitu teknik pirolisis yang dimana merupakan salah satu metode alternatif untuk menghasilkan energi terbaru untuk mengatasi masalah limbah dan energi saat ini, produk yang dihasilkan dari metode pirolisis diantaranya yaitu gas ringan, tar, *char*, arang hayati (*biochar*), arang aktif, briket arang, dan lainnya (Ramadhan, 2013).

Pirolisis ialah dekomposisi kimia bahan organik maupun anorganik tanpa atau sedikit oksigen, dalam proses pirolisis akan menghasilkan produk berfraksi gas, cair, dan residu padatan (Haryanto *et al.*, 2021a). Menurut Basu (2010), jenis pirolisis dibedakan berdasarkan laju proses pemanasan diantaranya sebagai berikut :

1. Pirolisis lambat

Pirolisis ini merupakan proses pirolisis yang memiliki laju pemanasan kurang lebih 400°C. Jenis ini umumnya menghasilkan produk cair dalam jumlah kecil, sedangkan hasil produk arang dan gas cenderung lebih banyak.

2. Pirolisis cepat

Pirolisis cepat merupakan proses pirolisis yang memiliki laju pemanasan sangat tinggi yaitu antara 1.000 – 10.000°C. Bahan baku yang sudah dimasukkan ke dalam reaktor akan dipanaskan dengan sangat cepat sehingga mencapai temperatur puncak (maksimal).

3. Pirolisis kilat

Proses pirolisis ini hanya berlangsung beberapa detik saja dengan suhu pemanasan yang sangat tinggi, ukuran partikel biomassa harus dalam ukuran sangat kecil sekitar 105 – 250 µm.

2.5 Arang

Arang merupakan residu hitam yang dihasilkan dengan menghilangkan kandungan air dan komponen volatile dari hewan ataupun tumbuhan (Uriya, 2019). Arang merupakan sumber karbon yang dihasilkan dari proses karbonisasi dan memiliki multi manfaat sebagai pemacu pertumbuhan maupun meningkatkan serapan hara karbon (Hidayat *et al.*, 2017a; Kwon *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2018). Umumnya arang didapatkan dengan memanaskan kayu, dan benda lainnya. Arang yang hitam, ringan, mudah hancur dan menyerupai batu bara terdiri dari 85-98% karbon dan sisa dari itu merupakan abu atau benda kimia lainnya (Uriya, 2019; Qi *et al.*, 2016).

Salah satu jenis bahan bakar alternatif berupa arang yang dibuat dari aneka macam bahan hayati atau biomassa seperti kayu, ranting, daun-daunan, rumput, jerami, maupun limbah pertanian lainnya yang dapat dikarbonisasi (Schlogl, 2013). Purnamaningtyas (2018) menyatakan bahwa arang umumnya diketahui sebagai pembenah tanah, karena arang sendiri mempunyai pori-pori yang dapat menyerap dan menyimpan air dan hara dan akan dikeluarkan kembali sesuai

kebutuhan. Menurut Zheng *et al.* (2010) suhu saat proses pengarangan akan mempengaruhi banyaknya produk yang dihasilkan, dengan adanya peningkatan suhu yakni dari 32,2% pada suhu 400°C sampai 20,2% pada suhu 700°C. Efek-efek suhu terhadap hasil proses pirolisis dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Efek Suhu Terhadap Pirolisis Arang

Suhu (°C)	Cairan (%)	Arang (%)	Gas yang Tidak Terdekomposisi (%)
400	48,3	34,2	12,1
500	54,4	27,0	13,4
550	56,8	23,2	4,0
600	56,3	22,0	5,6
700	54,2	20,2	21,3

Sumber : Zheng *et al.*, (2010).

Arang biasanya dimanfaatkan sebagai media tanam bagi tanaman karena kelebihan yang dimiliki oleh arang diantaranya arang bersifat ringan, cukup dapat menahan air, mengandung silikat yang tinggi, memiliki rongga yang banyak sehingga drainase dan aerasi arang baik untuk pertumbuhan akar, dan penggunaan arang untuk media tanam sangat menguntungkan bagi karena tanaman menjadi lebih tahan terhadap hama dan penyakit (Agustin *et al.*, 2014; Tarigan *et al.*, 2021). Selain itu arang juga memiliki kandungan unsur N, K, dan C yang tinggi untuk merangsang pertumbuhan akar dan daun tanaman (Agustin *et al.*, 2014; Sofyan *et al.*, 2014; Sudarsono *et al.*, 2014).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan pada bulan April – Agustus 2020 di tempat Fasilitas Penelitian dan Pengembangan PT Kendi Arindo Lampung, *Workshop* Teknologi Hasil Hutan, Laboratorium Lapang Terpadu dan Laboratorium Teknologi Hasil Hutan (THH) Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah pisau *cutter*, saringan plastik, sarung tangan, *stopwatch*, oven, *bomb calorimeter*, timbangan, laptop, kamera, pH meter, *blender*, alat tulis, *furnace*, cawan porselen. Bahan yang digunakan yaitu limbah kayu karet berupa sebetan yang berasal dari PT Kendi Arindo Lampung dan tandan kosong kelapa sawit berasal dari PT Anak Tuha Sawit Mandiri, dan akuades.

3.3 Batasan Penelitian

Batasan penelitian digunakan untuk menghindari adanya penyimpangan pokok masalah agar penelitian tersebut lebih terarah sehingga tujuan penelitian akan tercapai. Batasan-batasan penelitian pada penyusunan skripsi ini adalah sebagai berikut :

- 1 Arang yang diproduksi merupakan hasil pembuatan dengan skala komersial yang tidak mengalami 2 kali produksi sehingga menghasilkan beberapa ton dalam sekali produksi.
2. Bahan limbah kayu karet merupakan sampel tambahan yang hanya diproduksi dengan satu suhu untuk pembandingan karena PT Kendi Arindo Lampung hanya memproduksi arang kayu.

3.4 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen laboratorium (*Laboratory Experiment*) dengan menggunakan standar deviasi untuk mendapatkan hasil yang seragam. Sampel yang akan digunakan dalam penelitian ini diperiksa terlebih dahulu di laboratorium untuk memperoleh karakteristik dari sampel tersebut.

3.4.1 Tahapan Preparasi

Tahap preparasi bahan ini dilakukan dengan bahan limbah TKKS yaitu bahan masih dalam kondisi basah (setelah proses *steam*) langsung diaplikasikan dalam bentuk utuh atau tidak dicacah, dan untuk bahan kayu karet dalam kondisi limbah penggergajian (sebetan) dalam keadaan kering, sebelumnya sudah dipotong-potong dengan ukuran panjang sekitar 40-50 cm.

3.4.2 Pembuatan Arang

3.4.2.1 Pembuatan arang TKKS

Pembuatan arang pada penelitian ini dilakukan di tempat Fasilitas Penelitian dan Pengembangan PT Kendi Arindo Lampung, saat akan dilakukan pembuatan arang bahan sebelumnya sudah disiapkan lalu dimasukkan ke dalam tungku berbahan batu bata dan perekatnya berupa pasir dan tanah liat dengan kapasitas 12 m³. Untuk bahan baku TTKS, sebelum dimasukkan ke dalam tungku, tungku terlebih dahulu dimodifikasi dengan membuat alas yang terbuat dari plat-plat besi dan jarak dari permukaan tanah dan alas yaitu sekitar 20 cm. Sela bagian bawah tersebut berguna untuk tempat bahan pembakaran. Fungsi plat besi tersebut yaitu untuk memanaskan bahan baku karena bahan baku TKKS ini sendiri masih dalam keadaan basah, karena proses steam sebelumnya.

Saat bahan baku dimasukkan ke dalam tungku, untuk meminimalisir ruang kosong dalam tungku dengan bahan baku dibuatlah pipa besi yang memiliki lubang-lubang kecil. Pipa tersebut di masukkan ke dalam sela bahan baku TKKS dan mengarah ke atas yang berfungsi untuk membuang uap saat proses pirolisis. Setelah semua bahan baku masuk dan bahan pembakar sudah dinyalakan, lubang utama tungku ditutup rapat dengan menggunakan batu bata yang dilapisi dengan

pasir dan tanah liat. Saat proses pirolisis, seluruh lubang yang ada pada tungku dibiarkan terbuka terlebih dahulu kemudian setelah itu lubang di tutup rapat.

Setelah bahan baku sudah mulai terbakar merata, lubang kontrol tungku sedikit demi sedikit mulai ditutup menggunakan batu bata yang diplaster, suhu yang digunakan yaitu 400°C dan 600°C dan waktu yang dipakai proses pirolisis yaitu dengan kurun waktu 14 hari lamanya. Pada proses terakhir dalam produksi arang dalam proses pirolisis ini adalah pendinginan arang. Langkah-langkah yang perlu dilakukan yaitu pertama menghentikan pembakaran di dalam tungku kubah dengan menutup seluruh lubang udara yang tersisa termasuk cerobong asap atau lubang kontrol selama 7 hari. Waktu ini terhitung cukup lama, hal ini dikarenakan kapasitas arang dalam tungku yang sangat besar. Selain batasan 7 hari tersebut, untuk mengetahui keadaan arang di dalam tungku sudah dalam keadaan dingin, dapat dilakukan juga dengan memegang tungku kubah dan merasakan suhu di dalamnya, jika sudah normal dan tidak terasa panas arang sudah dingin dan siap dikeluarkan dalam tungku.

3.4.2.2 Pembuatan arang kayu karet

Bahan baku kayu karet dimasukkan dan disusun ke dalam tungku kubah dengan posisi penataan kayu dengan arah horizontal saat penataan diusahakan serapat mungkin untuk meminimalisir adanya oksigen yang masuk, karena semakin luas rongga maka pembakaran akan semakin besar. Api dibiarkan menyebar hingga ke dalam tungku dan membakar seluruh bagian secara merata. Setelah api sudah merata lubang kontrol tungku sedikit demi sedikit mulai ditutup menggunakan batu bata yang diplaster, suhu yang digunakan yaitu 600°C dan waktu yang dipakai proses pirolisis yaitu dengan kurun waktu 14 hari lamanya. Proses pendinginan arang dilakukan sama seperti pada pembuatan arang TKKS. Contoh gambar tungku dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Tungku kubah pembuatan arang hayati di PT Kendi Arindo Lampung.

3.4.3 Pengujian Arang Hayati

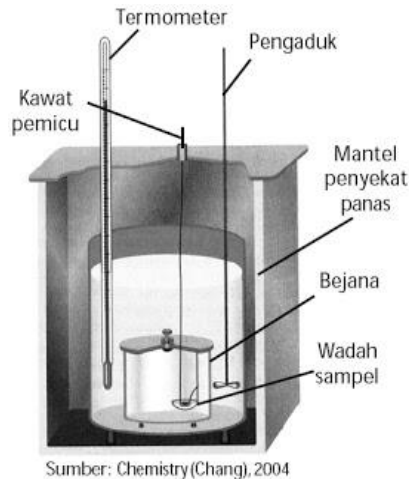
a. Rendemen Arang (*char yield*)

Arang tandan kosong kelapa sawit dan kayu karet ditimbang dan dihitung rendemennya menggunakan rumus berdasarkan SNI 06-3730-1995 berikut :

$$\text{Rendemen (\%)} = \frac{\text{Berat arang (g)}}{\text{Berat bahan baku (g)}} \times 100\%$$

b. Nilai Kalor

Prinsip yang digunakan dalam pengukuran nilai kalor adalah dengan pembakaran bahan bakar padat. Kalor pembakaran ditentukan dengan membakar sejumlah contoh uji sampel dengan pengendalian kondisi dalam *oxygen bomb calorimeter*. Kalor pembakaran dihitung berdasarkan temperatur sebelum pembakaran, selama dan setelah pembakaran hingga mencapai suhu optimum dengan mempertimbangkan koreksi pindah panas dan koreksi termokimia. Besarnya nilai kalor dapat dihitung dengan menggunakan standar SNI 8021-2014. Skema nilai kalor dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema *bomb calorimeter*.

- c. Rasio Densifikasi Energi (*Energy Densification Ratio*) dan Rendemen Energi (*Energy Yield*)

Perhitungan rasio densifikasi energi dan rendemen energi ini dihitung menggunakan rumus-rumus berikut (Cutter dan Ginnes, 1981):

$$\text{RDE} = \frac{\text{Nilai Kalor Arang (MJ/kg)}}{\text{Nilai Kalor Bahan Baku (MJ/kg)}}$$

Keterangan :

RDE= Rasio densifikasi energi

Energi rendemen (%) = Rendemen (%) X Rasio Densifikasi Energi

- d. Nilai pH

Pengukuran nilai pH sampel dihancurkan dan ditimbang seberat 3 g dan dioven terlebih dahulu. Setelah itu arang direbus menggunakan air ber pH netral sebanyak 100 ml kemudian air rebusan dengan arang tersebut didinginkan terlebih dahulu sebelum diukur dengan menggunakan pH meter. Metode ini dilakukan sesuai dengan standar TAPPI 435 (TAPPI 2006).

e. Analisis Proksimat

1. Kadar air

Arang akan diuji kadar airnya terlebih dahulu dipisah berdasarkan perlakuan yang berbeda yaitu kontrol, pada suhu 400°C, dan pada suhu 600°C. Sampel arang ditimbang terlebih dahulu sebelum dimasukkan ke dalam oven dengan suhu 100°C selama 24 jam. Sampel arang ditimbang kembali setelah pengovenan untuk mengetahui berat kering tanur. Nilai kadar air dinyatakan dalam persen. Besarnya kadar air dapat dihitung dengan menggunakan rumus standar SNI 6235-2000 sebagai berikut:

$$KA = \frac{(BA-BK)}{BK} \times 100\%$$

Keterangan:

KA: Kadar Air (%)

BA: Berat awal/basah (g)

BK: Berat Kering Tanur (g)

2. Kadar abu

Sampel yang akan diuji di tempatkan ke wadah yang sudah dioven dan sudah diketahui berat keringnya, cawan yang berisi sampel ditanurkan pada temperatur 800°C selama 3 jam dan sampel ditimbang sebanyak ± 2 g di dalam cawan porselen diabukan dalam tanur listrik pada suhu 550°C selama 2 jam dan perhitungan dilakukan dengan menggunakan perhitungan standar SNI 8675-2018 sebagai berikut:

$$\text{Kadar Abu (\%)} = \frac{\text{Berat Abu (g)}}{\text{Berat Sampel (g)}} \times 100\%$$

3. Kadar zat terbang

Sebanyak ± 2 g arang tandan kosong kelapa sawit dan arang di kayu karet timbang di cawan porselen beserta tutup. Cawan berisi sampel serbuk di masukkan ke dalam oven dengan suhu 950°C selama 7 menit. Setelah itu sampel

didinginkan dalam desikator dan ditimbang. Kadar zat terbang (KZT) dengan rumus standar SNI 8675-2018 dengan persamaan berikut :

$$\text{Kadar Zat Terbang (\%)} = \frac{\text{Kehilangan Berat Sampel (g)}}{\text{Berat Sampel Awal (g)}} \times 100\%$$

f. Kadar Karbon Terikat

Karbon terikat diuji berdasarkan standar SNI 8675-2018 ialah kandungan karbon dalam sampel setelah penghilangan kadar air, zat terbang, dan abu dengan persamaan berikut :

$$\text{Karbon Terikat (\%)} = 100\% - (\text{Kadar Air} - \text{Kadar zat terbang} - \text{Kadar Abu})$$

g. Analisis Perubahan Gugus Fungsi

Perubahan gugus fungsi untuk menentukan kualitas suatu biomassa menggunakan FTIR (*fourier transform infrared spectroscopy*) tipe varian 2000 FTIR *scimeter series* dengan metode KBr. Sampel digerus dalam mortar kecil bersama padatan KBr. Setelah selesai digerus, masukan sampel ke dalam cetakan berbentuk cincin dengan rata. Lalu dikompresikan dengan alat penekan hidrolis dan keluarkan sampel dari cetakan. Letakan sampel ke dalam *spectrofotometer IR* untuk kemudian dianalisis dimana semua spektrum dicatat pada suhu kamar.

Prinsip kerja spektrum FT-IR berupa *infrared* yang melewati celah ke sampel, dimana celah tersebut berfungsi mengontrol jumlah energi yang disampaikan kepada sampel. Kemudian ada beberapa *infrared* diserap oleh sampel dan yang lainnya ditransmisikan melalui permukaan sampel sehingga sinar *infrared* lolos ke detektor dan sinyal yang terukur kemudian dikirim ke komputer. Pengukuran gugus fungsi ini sesuai dengan standar ASTM E 1252-98 2013.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini ialah:

1. Rendemen yang dihasilkan dari proses produksi untuk arang TKKS sebesar 19,04% dengan nilai RDE (rasio densifikasi energi) 1,57 dan EY (rendemen energi) 29,81% pada suhu 400 °C dan 15,88 % 600°C RDE sebesar 1,52 dan nilai YE sebesar 24,15%, sedangkan pada arang kayu karet berkisar 32,00 % dengan nilai RDE sebesar 1,49 dan YE sebesar 47,76%.
2. Arang TKKS dan kayu karet yang dihasilkan memiliki karakteristik kimia sebagai berikut: (1) Nilai pH arang yang paling tinggi diperoleh arang TKKS pada suhu 400 °C dan 600°C berkisar antara 8,8 – 9,4, nilai pH yang dihasilkan dapat digunakan untuk pembenah tanah yang ber-pH masam sehingga memenuhi standar kualitas jika arang tersebut dijadikan untuk media pembenah tanah, dan (2) perubahan gugus fungsi dari arang TKKS dan kayu karet yaitu C=O, C=C, C-H, O-H, dimana gugus C=O merupakan perubahan pita dari hemiselulosa, gugus fungsi C=C dari lignin, C-H dari gugus selulosa dan hemiselulosa, dan gugus fungsi O-H vibrasi dari gugus hidroksil.
3. Pengaruh suhu yang digunakan terhadap sifat fisis arang yang dihasilkan dalam penelitian ini adalah (1) nilai kalor arang TKKS berkisar 20,05 MJ/kg pada suhu 600°C, sedangkan untuk arang 20,65 MJ/kg pada suhu 400°C dan nilai kalor untuk kayu karet berkisar 28,31 MJ/kg untuk suhu 600°C, dapat disimpulkan bahwa nilai kalor dari hasil penelitian ini sudah sesuai dengan persyaratan SNI tahun 2000. (2) Kadar air untuk arang TKKS berkisar 8,85% suhu (400°C) dan 5,99% (600°C), sedangkan untuk arang kayu karet berkisar 6,16%, kadar air arang TKKS dan kayu karet juga sudah memenuhi

standarisasi dari SNI tahun 1995, (3) Nilai kadar abu yang paling tinggi terdapat pada arang TKKS dengan perlakuan suhu 600°C merupakan bahan baku yang melebihi syarat maksimum dari SNI, dan (4) dalam penelitian ini kadar karbon terikat semua sampel sudah sesuai dengan persyaratan dari SNI untuk arang TKKS pada suhu 600°C sebesar 67,51% dan untuk kayu karet sebesar 85,63%, di mana hasil kadar karbon terikat ini akan terus naik dengan meningkatnya suhu yang digunakan, (5) hasil kadar zat terbang semua sudah memenuhi persyaratan SNI dimana persyaratan maksimum 25%.

5.2 Saran

Penelitian lebih lanjut sangat diperlukan terkait penggunaan suhu dengan penambahan bahan baku yang berbeda, serta analisis yang sesuai dengan Standar Nasional Indonesia arang sebagai bioenergi.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustin D.A., Riniarti, M., Duryat. 2014. Pemanfaatan limbah serbuk gergaji dan arang sekam sebagai media sapih untuk cempaka kuning (*Michelia champaca*). *Jurnal Sylva Lestari* 2(3): 49-58.
- Aisyah, I. 2019. *Multimanfaat Arang dan Asap Cair dari Limbah Biomassa*. Buku. CV Budi Utama. Sleman. 166 hlm.
- Arsad, E. 2014. Sifat fisik dan kimia wood pelet dari limbah industri perkayuan sebagai sumber energi alternatif. *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan* 6(1): 1-8.
- Arsyad, S. 2012. *Konservasi Tanah dan Air*. Buku. IPB Press. Bogor. 290 Hlm.
- ASTM Standards. 2013. E1252-98 *Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Artika, K. R., Panji, I. M., Sahisnu, T., Hanief, H. 2019. Pemurnian selulosa tandan kosong kelapa sawit (tkks) secara biologi dan kimiawi untuk pembuatan na-cmc. *Menara Perkebunan* 87(1): 52-59.
- Basu, P. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory Elsevier*. Buku. Academic press. New York. 376 hlm.
- Boerhendhy, I., Suryaningtyas, H., Agustina, D.S. 2010. *Basic characteristics of rubber wood from some recommended clones*. Presented in IRRDB Annual Meeting and International Rubber Conference 2010. Sanya. Hainan. China. 19 hlm.
- Budiman, H. 2012. *Budidaya Karet Unggul*. Buku. Pustaka Baru Press. Yogyakarta. 240 hlm.
- Cutter, B. E., McGinnes. 1981. A note on density change patterns in charred wood. *Wood and Fiber Science* 13(1): 39-44
- Duryat., Sylvain, R., Marck, P.C. 2013. Dynamic of plantation of oil palm small holdings in Riau Province Sumatra Indonesia. *Jurnal Sylva Lestari* 1(1): 93-100.

- Elsaprike, J., Yahya, S. P. R., Yuwan. 2018. Pembuatan arang dengan metode tungku pirolisis double burner menggunakan limbah kayu dengan metode manduk di Kecamatan Tebing Tinggi Kabupaten Empat Lawang. *Jurnal Penelitian Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan* 7(2): 33–40.
- Febrianto, F., Hwee, S. P., Man, C. K., and Hidayat, W. 2017. Properties enhancement of rubber wood particleboard laminated with low density polyethylene (LDPE) resin. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis* 10(2): 186–194.
- Gani, A. 2010. *Multiguna Arang-Hayati Biochar*. Buku. Warta penelitian dan pengembangan pertanian. Sinar Tani. Jakarta. Edisi 13-19: 4 hlm.
- Geonadi, D. H., dan santi, I. P. 2017. Kontroversi aplikasi standar mutu biochar. *Jurnal Sumber Daya Lahan* 11(1): 23-32.
- Harahap, I.Y., Hidayat, T.C., Simangunsong, G., Sutarta, E.S., Pangaribuan, Y., Listi, E., Rahutomo, S. 2011. *Mucuna Bracteata Pengembangan dan Pemanfaatannya di Perkebunan Kelapa Sawit Edisi 2*. Buku. Pusat Penelitian Kelapa sawit. Medan. 44 hlm.
- Hartono, R., Erwinsyah, Hidayat, W., Damayanti, R. 2019. Effect of impregnation methods and bioresin concentration on physical and mechanical properties of soft-inner part of oil palm trunk. *Journal of Physics: Conference Series* 1282: 012078.
- Hartono, R., Wahyudi, I., Febrianto, F., Dwianto, W., Hidayat, W., Jang, J. H., Lee, S. H., Park, S. H., Kim, N. H. 2016. Quality improvement of oil palm trunk properties by close system compression method. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 44(2): 172–183.
- Harum, O.M.A., Febryano, I.G.F., Wulandari, C., Hiayat, W. 2019. Pelestarian ghumah baghi (rumah tradisional berbahan dasar kayu) di Kelurahan Pelang Kenidai, Kota Pagaralam. *Jurnal Hutan Tropis* 7(2): 216-224.
- Haryanti, A., Norsamsi., Sholiha, P. S. F., Putri, N. P. 2014. Studi pemanfaatan limbah padat kelapa sawit. *Jurnal Konversi* 3(2): 20-29.
- Haryanto, A., Hidayat, W., Hasanudin, U., Iryani, D.A., Kim, S.D., Lee, S.H., Yoo, J.H. 2021a. Valorization of Indonesian wood wastes through pyrolysis: a review. *Energies* 14(5): 1407.
- Haryanto, A., Iryani, D.A., Hasanudin, U., Telaumbanua, M., Triyono, S., Hidayat, W. 2021b. Biomass fuel from oil palm empty fruit bunch pellet: potential and challenges. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management* 8(1): 33-42.

- Hernawati, S. 2015. Potensi kayu rakyat pada kebun campuran di Desa Pesawaran Indah Kabupaten Pesawaran. *Jurnal Sylva Lestari* 3(1): 113-120.
- Heny, A., Evi, S., Sonia, S. 2020. Pengaruh bahan perekat tapioka dan sagu terhadap kualitas briket arang kulit buah nipah. *Jurnal Perennial* 16 (1): 11-17.
- Hidayat, W., Jang, J. H., Park, S. H., Qi, Y., Febrianto, F., Lee, S. H., Kim, N. H. 2015. Effect of temperature and clamping during heat treatment on physical and mechanical properties of okan (*Cylicodiscus gabunensis*) Wood. *Bioresources* 10(4): 6961–6974.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J. H., Febrianto, F., Lee, S. H., Kim, N. H. 2016. Effect of treatment duration and clamping on the properties of heat-treated okan wood. *Bioresources* 11 (4): 10070–10086.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J. H., Febrianto, F., Lee, S. H., Chae, H. M., Kondo, T., Kim, N. H. 2017a. Carbonization characteristics of juvenile woods from some tropical trees planted in Indonesia. *Journal of the Faculty of Agriculture*. Kyushu University 62(1): 145–152.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J. H., Febrianto, F., Kim, N. H. 2017b. Effect of mechanical restraint on drying defects reduction in heat-treated okan wood. *Bioresources* 12(4): 7452–7465.
- Hidayat, W., Febrianto, F. 2018. *Teknologi Modifikasi Kayu Ramah Lingkungan: Modifikasi Panas dan Pengaruhnya terhadap Sifat-sifat Kayu*. Buku. Pusaka Media. Bandar Lampung. 127 hlm.
- Hidayat, W., Ma'ruf, S.D., Abdillah, M., Prayoga, S., Zevan, R., Prihastono, G.B.A., Hardianto, A.H., Ridjayanti, S.M. 2020a. *Perlakuan Minyak Panas (Hot Oil Treatment) pada Kayu*. Buku. Pusaka Media. 58 hlm.
- Hidayat, W., Rani, I.T., Yulianto, T., Febryano, I.G., Iryani, D.A., Hasanudin, U., Lee, S.H., Kim, S.D., Yoo, J.H., Haryanto, A. 2020b. Peningkatan kualitas pelet tandan kosong kelapa sawit melalui torefaksi menggunakan reaktor counter-flow multi baffle (comb). *Jurnal Rekayasa Proses* 14(2): 169-181.
- Iryani, D.A., Haryanto, A., Hidayat, W., Amrul, Talambanua, M., Hasanudin, U., Lee, S.H. 2019. Torrefaction Upgrading of Palm Oil Empty Fruit Bunches Biomass Pellets for Gasification Feedstock by Using COMB (Counter Flow Multi-Baffle) Reactor. *7th TAE (Trend in Agricultural Engineering)*. 212-2017.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2017. *Statistika Kehutanan Indonesia 2017*. Buku. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Jakarta. 355 Hlm.

- Kementerian Perindustrian, 2012. *Nilai Impor Barang Jadi Karet Berdasarkan Negara Asal*. Kementerian Perindustrian. Jakarta.
- Kim, J.H., Kim, D.H., Kim, S.H., Suri, I.F., Purusatama, B.D., Jo, J.I., Lee, H.S., Hidayat, W., Febrianto, F., Lee, S.H., Kim, N.H. 2021. Comparison of anatomical features in the three syzygium species. *BioResources* 16(2): 3631-3642.
- Komarayati, S. dan. Pari, G. 2012. Arang hayati dan turunannya sebagai stimulan pertumbuhan jabon dan sengon. *Jurnal Buana Sains* 12 (1): 1-6.
- Kwon, G, J., Kim, A, R., Lee, H, S., Lee, S, H., Hidayat, W., Febrianto, F., dan Kim, N, H. 2018. Characteristics of white charcoal produced from the charcoal kiln for thermotherapy. *J. Korean Wood Sci. Technol* 46(5): 527-540.
- Lestari, R.Y. 2013. *Sifat Papan Partikel Tanpa Perekat dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (Elaeis guineensis Jacq.)*. Balai Riset dan Standardisasi Industri Banjarbaru. Kalimantan Selatan. *Widyariset* 16 (2): 219–226.
- Lestari, M.D., Sudarmin., Harjono. 2018. Ekstraksi selulosa dari limbah Pengolahan agar menggunakan larutan naoh sebagai prekursor bioetanol. *Indonesian Journal of Chemical Science* 7 (3): 236-242.
- Matangaran, J.R., Anggoro. R. 2012. Limbah pemanenan kayu jati di Banyuwangi Jawa Timur 2012. *Jurnal Perennial* 8 (2): 88-92.
- Mawardiana. 2013. Pengaruh residu biochar dan pemupukan npk terhadap sifat kimia tanah dan pertumbuhan serta hasil tanaman padi musim tanam ketiga. *Jurnal Konservasi Sumber Daya Lahan* 1 (1): 16-23.
- Munawar, A. 2011. *Kesuburan Tanah dan Nutrisi Tanaman*. Buku. IPB Press. Bogor 240 Hlm.
- Nandini, N.H., Anas, M., Erniwati. 2020. Analisis variasi temperatur aktivasi terhadap gugus fungsi arang aktif tandan aren (*Arenga pinnata merr.*) Dengan agen aktivasi potassium silicate (k_2sio_3). *Jurnal Penelitian Pendidikan Fisika* 5 (4): 295-299.
- Nurhayati., Fatma dan MI Amiruddin. 2010. Ketahanan enam klon karet terhadap infeksi *corynespora* penyebab penyakit gugur daun. *Jurnal HPT Tropika* 10 (1): 47-51.
- Nurkholifah, V., Rinarti, M., Prasetya, H., Hasanudin, U., Niswati, A., dan Hidayat, W. 2020. Karakteristik arang dari limbah kayu karet (*Hevea brasiliensis*) dan tandan kosong kelapa sawit (*Elaeis guineensis*). *Seminar Nasional Konservasi 21 April 2020: Konservasi Sumberdaya Alam untuk Pembangunan Berkelanjutan*. Hal. 235-240.

- Pahan, I. 2012. *Panduan Lengkap Kelapa Sawit, Manajemen Agribisnis dari Hulu ke Hilir*. Buku. Penebar Swadaya. Jakarta. 412 hlm.
- Pari, G., Mahfudin., Jajuli. 2012. *Teknologi Pembuatan Arang, Briket Arang Dan Arang Aktif serta Pemanfaatannya*. Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan. 9 Hlm.
- Park, S. H., Jang, J. H., Qi, Y., Hidayat, W., Hwang, W. J., Febrianto, F., Kim, N. H. 2018. Anatomical and physical properties of indonesian bamboos carbonized at different temperatures. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 46(6): 9–18.
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.1/MENLH/SETJEN/KUM.1/1/2019. 2019. Izin Usaha Industri Primer Hasil Hutan. Buku. Jakarta. 65 hlm.
- Purnamaningtyas, A. 2018. *Pengaruh penambahan arang kayu dan konsentrasi larutan cuka kayu terhadap pertumbuhan semai kepuh (*Sterculia foetida* L.)*. Skripsi. Fakultas pertanian. Universitas Muhammadiyah Malang. 36 Hlm.
- Qi, Y., Jang, J. H., Hidayat, W., Lee, A. H., Lee, S. H., Chae, H. M., Kim, N. H. 2016. Carbonization of reaction wood from *Paulownia tomentosa* and *Pinus densiflora* branch woods. *Wood Science and Technology* 50(5): 973–987.
- Rachma, O., Malik J. 2011. Penggergajian dan permesinan kayu untuk industri perKayuan Indonesia. *Prosiding*. Balai Penelitian Dan Pengembangan Kehutanan dan Perkebunan. Bogor. 720 hlm.
- Rahayu, S. E., Hasibuan, L. S. 2016. Analisis pengaruh investasi terhadap perkembangan industri di kota medan. *Jurnal Riset Akutansi dan Bisnis* 10 (1): 83 – 103.
- Raju, M., Armansyah H. T., Radite, P.A.S. 2016. Karakterisasi arang dan gas-gas hasil pirolisis limbah kelapa sawit. *Jurnal Keteknik Pertanian*. 4 (2): 153-160.
- Ramadhan, A., Ali, M., 2013. Pengolahan sampah plastik menjadi minyak menggunakan proses pirolisis. *Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*. 4 (1).
- Rani, I. T., Hidayat, W., Febryano, I. G., Iryani, D.A., Haryanto, A., Hasanudin, U. 2020. Pengaruh torefaksi terhadap sifat kimia pelet tandan kosong kelapa sawit. *Jurnal Teknik Pertanian*. Vol 9(1): 63–70.
- Refqi, M., Indrawati, Rahmiana, Z. 2013. Analisis warna, bau, ph, fe, zn, dan n-organik pada kompos yang dibuat dari tandan kosong kelapa sawit dengan menggunakan aktivator lumpur aktif PT Bumi Sarimas Indonesia. *Jurnal Kimia Unand*. 2 (2): 36-43.

- Rubiyanti, T., Hidayat, W., Febryano, I. G., Bakri, S. 2019. Karakterisasi pelet kayu karet (*hevea brasiliensis*) hasil torefaksi dengan menggunakan reaktor counter-flow multi baffle (comb). *Jurnal Sylva Lestari* 7(3): 321–331.
- Rumiyanti, L., Irnanda, A., Hendronursito, Y. 2018. Analisis proksimat pada briket arang limbah pertanian. *Jurnal Fisika dan Alikasinya*. 3 (1): 15– 2.
- Sasmita, D.K., Anas, I., Anwar, S., Yahya, S., Djajakirana, G. 2017. Pengaruh pupuk organik dan arang hayati terhadap kualitas media pembibitan dan pertumbuhan bibit kakao. *Jurnal Tanaman Industri dan Penyegar*. 4 (2):107–120.
- Schlogl, R., 2013, *Chemical Energy Storage*. Buku. De Gruyter. Berlin. Boston. 479 hlm.
- Shobar., Sribudiani, E., Somadona, S. 2020. Karakteristik briket arang dari limbah kulit buah pinang dengan berbagai komposisi jenis perekat. *Jurnal Sylva Lestari* 8(2): 189-196.
- Soenarno., Wesman, E., Sona, S. 2018. Studi faktor pemanfaatan dan limbah pemanenan kayu di hutan alam Papua Barat. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 36 (2): 67–84.
- Sofyan, S. E., Riniarti, M., Duryat. 2014. Pemanfaatan limbah teh, sekam padi, dan arang sekam sebagai media tumbuh bibit trembesi (*samanea saman*). *Jurnal Sylva Lestari* 2 (2): 61–70.
- Silaen, T. 2018. *Limbah Petak Tebang dan Faktor Eksploitasi Pemanenan Kayu Eucalyptus Hybrid (Ind 61) Di Hutan Tanaman Industri Toba Pulp Lestari, Tbk, Sektor Tele, Sumatera Utara*. Skripsi. Universitas Sumatera Utara. 60 hlm.
- Sudarsono, E. S., Melya, R., Duryat. 2014. Pemanfaatan limbah teh, sekam padi, dan arang sekam sebagai media tumbuh bibit trembesi (*Samanea saman*). *Jurnal Sylva Lestari* 2 (2): 61-70.
- Sukarta, I.N dan Oka, L.P.A.L. 2017. Analisis proksimat pada pelet bahan bakar dari kotoran babi yang dikombinasikan dengan limbah kayu. *Jurnal Sains dan Teknologi* 6(2): 220–227.
- Sulistio, Y., Febryano, I. G., Yoo, J., Kim, S., Lee, S., Hasanudin, U., Hidayat, W. 2020. Pengaruh torefaksi dengan reaktor counter-flow multi baffle (comb) dan electric furnace terhadap pelet kayu jabon (*Anthocephalus cadamba*). *Jurnal Sylva Lestari* 8(1): 65–76.
- Sutrisno, L. 2013. Pemanfaatan limbah kayu mahang (*Macaranga sp*) dari industri penggergajian kayu sebagai bahan pembuatan cuka kayu (*wood*

vinegar). Skripsi. *Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Riau*. 29 hlm.

- Syamsiro, M. 2016. Peningkatan kualitas bahan bakar padat biomassa dengan proses densifikasi dan torefaksi. *Journal Mek. Sist. Termal*. 1 (1): 7-13.
- Tarigan, A.A.L.B., Riniarti, M., Prasetya, H., Hidayat, W., Niswati, A., Banuwa, I.S., Hasanudin, U. 2021. Pengaruh biochar pada simbiosis rhizobium dan akar sengon laut (*Paraserianthes falcataria*) dalam media tanam. *Journal of People, Forest and Environment* 1(1): 11-20.
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2009. Tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Buku, Jakarta.. 110 Hlm.
- Uriya.. 2019. *Pembuatan Karbon Aktif dari Arang dengan Activator Asam Klorida sebagai Penurun Kadar Ammonia dalam Air Limbah*. Skripsi. Fakultas Teknik Dan Sains. Universitas Muhammadiyah Purwokerto. 44 hlm.
- Warlina, L., Ilim, I., Simanjuntak, W. 2013. Pengolahan limbah cair hotel dengan kombinasi metode elektrokoagulasi dan adsorpsi menggunakan karbosil. *Jurnal Sylva Lestari* 1(1): 85-92.
- Wibowo, T., Setyawati, D., Nurhaida., Diba, F. 2016. Kualitas biopellet dari limbah batang kelapa sawit dan limbah kayu penggergajian. *Jurnal Hutan Lestari*. 4 (4): 409-417.
- Wibowo, T.I.R., Riniarti, M., Prasetya, H., Hasanudin, U., Niswati, A., Hidayat, W. 2020. Karakterisasi arang hayati dari limbah kayu sengon (*Falcataria moluccana*) dan meranti (*Shorea sp.*). *Seminar Nasional Konservasi 21 April 2020: Konservasi Sumberdaya Alam untuk Pembangunan Berkelanjutan*. 560-563 hlm.
- Yulianto, T, Febryano, I.G, Iryani, D.A., Haryanto, A., Hasanudin, U., Hidayat, W. 2020. Perubahan sifat fisis pelet tandan kosong kelapa sawit hasil torefaksi. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 9 (2): 104-111.
- Zheng, W. B. K, Sharma., N, Rajagopalan. 2010. *Using Biochar as a Soil Amandement for Sustainable Agriculture*. Illinois Departement Of Agriculture. Champaign. 36 hlm.