Jurnal Agroteknologi
Journal homepage: https://jaet.usu.ac.id

Technique of Biochar Production

Teknik Produksi Biochar

Benny Hidayat[1*], Abdi Pramuga[2]
[1]*Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Sumatera Utara, Medan, 20155, Indonesia*
[2]*Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Sumatera Utara, Medan, 20155, Indonesia*
[*]Corresponding Author: bendayat@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:
Received 28 February 2024
Revised 30 August 20204
Accepted 05 September 2024
Available online:
https://talenta.usu.ac.id/joa

E-ISSN: 2356-4725
P-ISSN: 2655-7576

How to cite:
Hidayat, B. dan A. Pramuga. (2024). Teknik Produksi Biochar. Jurnal Agroteknologi, 12(3), 01-011

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.
http://doi.org/10.32734/ja.v12i3.15789

ABSTRACT

The abundance of biomass in Indonesia can be a big threat if not managed properly with the principle of carbon retention. The loss of large amounts of carbon into the air in the form of C02 has become a concern for the increase in global temperatures. Biochar is one of the solutions to maintain carbon on earth for a long period of time. Biochar is an amendment that today has been around the world for more than 10 years, and has been the subject of many studies, the quality of biochar is highly determined by the techniques used. The manufacture of biochar is the same as the manufacture of charcoal but there is a slight difference other than in its utilization, because the manufacture of charcoal uses 1 technique of making biochar. The Pyrolysis method is a method of making biochar, and the technique is 2 ways, namely by using Kiln and Retort. The Klin technique is a heating technique with a heat source coming from the material itself, namely combustion with limited oxygen, while the heating retort with a heat source is not from biomass but from other sources.
Keyword: Tecnique, Biochar, Klin, Retort, Production

ABSTRAK

Melimpahnya biomassa di Indonesia bisa menjadi ancaman yg besar bila tidak dikelola dengan benar dengan prinsip mempertahankan karbon. Hilanganya karbon dalam dalam jumlah yg besar ke udara dalam bentuk $C0_2$ telah menjadi kekhawatiran akan peningkatan suhu bumi. Biochar merupakan salah satu solusi untuk mempertahankan karbon di bumi dalam jangka waktu yg cukup Panjang. Biochar merupakan merupakan amandemen yg hari ini telah mendunia lebih dari 10 tahun, dan menjadi topik banyak penelitian, Kualitas biochar sangat di tentukan oleh Teknik yag digunakan. Pembuatan biochar sama seperti pembuatan arang tetapi ada sedikit perbedaan selain pada pemanfaatannya, karena pembuatan arang menggunakan 1 teknik dari pembuatan biochar. Metode Pirolisis merupakan metode pembuatan biochar, dan teknik nya ada 2 cara, yaitu dengan menggunakan Kiln dan Retort. Teknik Klin adalah teknik pemanasan dengan sumber panas berasal dari bahan itu sendiri yaitu pembakaran dengan oksigen terbatas, sedang retort pemanasan dengan sumber panas bukan dari biomassaa tetapi dari sumber lainnya.tekniknya juga terbagi 2 ada retort terbuka dan retort tertutup masing masing Teknik memiliki hasil yg berbeda.
Keyword: *Teknik, biochar, retort, Klin, Produksi*

1. PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara tropis, kaya akan bahan pembenah tanah organik alami yang tidak bertahan lama, karena laju penguraian (pelapukan) bahan organik relatif cepat. Saat ini, penggunaan biochar/arang dari limbah

pertanian sebagai alternatif pembenah tanah mulai bermunculan di seluruh dunia. Biochar dapat bertahan lama di dalam tanah dan mempunyai efek yang relatif tahan lama atau relatif tahan terhadap serangan mikroba sehingga mengakibatkan proses dekomposisi menjadi lambat (Tang et al.2013). Beberapa tahun lalu, masyarakat adat Amazon menambahkan arang ke tanah mereka,dan hingga saat ini (100-1000 tahun kemudian), kualitas sifat fisik dan kimia tanah terbukti jauh lebih baik dibandingkan tanah di sekitarnya (Steiner dkk. 2007). Oleh karena itu, biochar dapat menjadi alternatif pembenah tanah yang potensial untuk meningkatkan kualitas lahan terdegradasi, khususnya lahan suboptimal.

Hasil analisis Sarwani dkk (2013) melaporkan bahwa potensi biomassa pertanian yang dapat dikonversi menjadi biochar secara nasional diperkirakan sekitar 10,7 juta ton, dimana akan dihasilkan 3,1 juta ton biochar. Potensi pemanfaatan biochar untuk restorasi lahan kering di 59 lahan pertanian yang dapat dikonversi menjadi biochar diperkirakan sekitar 10,7 juta ton, yang setara dengan produksi biochar sebesar 3,1 juta ton. Sekam padi mempunyai potensi paling besar yaitu mencapai 6,8 juta ton per tahun dan menghasilkan 1,77 juta ton biochar per tahun. Jumlah ini setara dengan 56,48% dari total potensi biochar di negara ini (Tabel 1). Tingginya potensi biomassa untuk dimanfaatkan sebagai biochar sangat bergantung pada ketersediaan dan persaingan dengan pemanfaatan lain.

Terra preta telah diterapkan ratusan bahkan ribuan tahun lalu oleh bangsa Amerindian di lembah Amazon, Brazil (Lehmann *et al.*, 2006). Terra preta merupakan tanah hitam yang subur karena adanya penambahan biochar sebagai pembenah tanah (Adimihardja, 2008). Kesuburan tanah terra preta disebabkan oleh tingginya kandungan bahan organik dan retensi hara karena adanya kandungan karbon hitam (Lehmann & Rondon, 2006). Tingkat keberlanjutan pemanfaatan terra preta ini cukup tinggi karena sederhana dan murah, sehingga memungkinkan masyarakat untuk mengelola teknologi ini secara mandiri. Selain itu juga tanah terra petra dipercaya dapat mempertahankan kandungan karbon organik sehingga kesuburannya akan tetap terjaga tanpa harus sering dilakukan pemupukan. Dengan begitu, selain menghasilkan produk sayuran bernilai ekonomi tinggi, penerapan terra preta juga dapat menghemat penggunaan pupuk sehingga dapat menumbuhkan semangat masyarakat untuk mengelolanya (Kartijono et al., 2021).

Sohi, et al (2009) mendefinisikan biochar sebagai residu padat yang kaya karbon, dihasilkan oleh dekomposisi termal biomassa dari tanaman, pada keadaan sedikit atau tanpa oksigen. Biochar merupakan biomassa yang telah dipirolisis pada kondisi lingkungan rendah atau tanpa oksigen yang diaplikasikan ke tanah pada tempat tertentu yang diharapkan untuk penyimpanan karbon secara berkelanjutan dan merangkap memperbaiki fungsi tanah pada manajemen saat ini dan masa depan sambil menghindari efek yang merugikan bagi lingkungan yang lebih luas dalam jangka pendek dan jangka panjang dan juga bagi kesehatan manusia dan hewan
.
Kualitas biochar selain ditentukan oleh jenis biomassa juga teknik yg digunakan dalam memproduksinya (Hidayat et al.,2018) hal ini berhubungan dengan karakter yg dikendaki dari biochar tersebut. Biochar yg diproduksi dengan metode kiln umumnya memiliki sifat fisik yg baik, seperti luas permukaan tinggi, dan porositas yg tinggi tetapi kandungan asam organik yg rendah.

Biomassa sabut kelapa juga sering dimanfaatkan untuk keperluan lain yaitu sebagai sumber energi, sedangkan tongkol jagung dapat dimanfaatkan sebagai pakan ternak. Sumber lain yang dapat dimanfaatkan adalah sisa ranting pohon, batang singkong, semak kelapa sawit yang kosong, dan batang tanaman bakau. Sumber bahan baku untuk biochar pada dasarnya adalah limbah pertanian, dan walaupun penggunaan bahan baku dari penebangan hutan dan tanaman lainnya sangat dihindari, penggunaan limbah dari industri kayu sangat memungkinkan.

Salah satu upaya mitigasi dalam menghadapi perubahan iklim adalah dengan meningkatkan sekuestrasi karbon diantaranya dalam bentuk biochar. Biochar terbukti efektif dalam menurunkan kemasaman tanah pada lahan kering masam yang banyak ditemui pada lahan pertanian di Indonesia. Kemasaman tanah pada lahan kering masam umumnya disebabkan tingginya konsentrasi aluminium yang menyebabkan pertumbuhan tanaman menjadi terhambat dan mengurangi potensi lahan untuk menghasilkan pangan. Biochar juga mampu mengurangi pencucian pestisida dan unsur hara dan pada akhirnya berdampak pada peningkatan kualitas lingkungan (Nurida, 2014).

Tabel. Perkiraan Produksi Beberapa Biomassa Pertanian dan Potensinya Menjadi Biochar

Biomassa Pertanian	Jumlah (Ton/ha)	Asumsi konversi ke biochar (%)	Potensi konversi ke biochar (Ton/ha)	Rasio (biochar/ biomassa)	Potensi biochar (Ton/ha)	Proporsi (%)
Sekam padi	13.612.343	50	6.806.172	0.26	1.769.605	56.48
Tempurung Kelapa	539.644	50	269.822	0.25	67.456	2.15
Tempurang Kelapa sawit	6.400.000	30	1.920.000	0.5	960.000	0.03
Kulit buah Kakao	1.208.553	50	604.277	0.33	199.411	6.35
Tongkol Jagung	3.652.372	30	1.095.712	0.13	142.443	4.54
Total	25.412.912		10.695.982		3.138.914	100,0

(Sarwani *et al.,* 2013).

Pemanfaatan biochar di Indonesia dalam pengelolaan lahan masih sangat jarang dilakukan dan kualitas biochar dan penggunaan biochar tergolong rendah dan sedikit sementara jumlah limbah pertanian dan hutan sedemikian besar, diantaranya dari hasil pembukaan lahan maupun aktivitas pemanenan. Berdasarkan data, potensi limbah biomassa berkayu hasil pembalakan hutan sekitar 29,70 juta m3 /tahun, limbah industri pengergajian kayu ± 1,40 juta m3 /tahun dan limbah perkebunan sekitar 27,32 juta m3 /tahun (Anggraini, et al., 2015). Dengan demikian pembuatan biochar berdampak besar untuk pengolahan biomassa yang berlimpah yang ada di alam selain itu biochar penting dibuat karena biochar lebih lambat teroksidasi di bandingkan kompos hal karena aktivitas mikroba yg berbeda dan serta struktur karbon biochar mendekati karbon anorganik (Hidayat, 2018).

2. PRODUKSI BIOMASSA

Biomassa adalah adalah produk utama fotosintesis yg menurunkan material biologis yang menawali kehidupan, atau organisme yang berstruktur karbon dan campuran kimiawi bahan organik yang mengandung hidrogen, nitrogen, oksigen, dan sejumlah kecil dari atom - atom dan elemen-elemen lainnya. Biomassa adalah bahan organik yang dihasilkan melalui proses fotosintesis, yaitu penyimpanan energi dari matahari, yang menyediakan energi bagi tanaman untuk mengubah air dan karbon dioksida menjadi oksigen dan gula. Gula ini disebut karbohidrat dan disimpan sebagai sumber energi pada tumbuhan dan hewan yang memakannya. Makanan kaya karbohidrat merupakan sumber energi yang sangat baik bagi tubuh manusia. Biomassa merupakan sumber energi terbarukan. Karena persediaannya tidak terbatas untuk tanaman pangan, pertanian, dan lain-lain, serta limbah yang dihasilkan dapat dimanfaatkan kapan saja (Ridhuan dan Dwi, 2020).

Biomassa juga dapat mencakup limbah biodegradable yang dapat dibakar untuk bahan bakar, seperti jerami, tempurung, tempurung kelapa, tandan buah kosong dan tempurung kelapa, serta limbah kayu. Biomassa merupakan sumber daya terbarukan yang dapat dikembangkan secara berkelanjutan di masa depan. Biomassa memiliki sifat lingkungan yang sangat baik karena tidak ada karbon dioksida yang dilepaskan ke atmosfer dan kandungan sulfurnya sangat rendah. Artinya biomassa tidak berkontribusi terhadap perubahan global. Biomassa memiliki potensi ekonomi yang besar seiring dengan kenaikan harga bahan bakar fosil di masa depan (Ridhuan, K dan Dwi, I., 2020).

Biomassa disebut juga pitomas dan sering diterjemahkan sebagai sumber daya hayati atau sumber daya yang berasal dari kehidupan. Basis sumber daya mencakup ratusan atau ribuan spesies tumbuhan, berbagai sumber daya darat dan laut, pertanian dan kehutanan, serta sisa limbah dan proses industri, limbah dan kotoran hewan. Tanaman energi yang menciptakan kebun energi skala besar merupakan salah satu biomassa yang menjanjikan, meskipun saat ini belum dikomersialkan. Secara khusus, biomassa mengacu pada kayu, rumput gajah, lobak, eceng gondok, makroalga, klorella, serbuk gergaji, serpihan kayu, jerami, sekam padi, sisa makanan, lumpur pulp, dan kotoran hewan. Kayu putih, poplar hibrida, kelapa sawit, tebu, rumput gajah, dll termasuk dalam kategori ini (Ridhuan, K dan Dwi, I., 2020).

Sekam padi merupakan lapisan saringan keras (karyopsis) yang terdiri dari dua bagian yang saling berhubungan: lemma dan palea. Pada saat beras digiling, sekam padi terpisah dari butiran beras dan menjadi residu atau limbah penggilingan. Komponen utama sekam padi adalah selulosa 31,4-36,3%, hemiselulosa 2,9-11,8%, dan lignin 9,5-18,4%. Kadar air 32,40-11,45%. Serat 31,37-49,92%. Abu 13.16 – 29.04 (Sampanye,

2004). Sekam padi mempunyai banyak keunggulan, permukaan luar dari sekam padi dapat digunakan sebagai penyerap dan penyekat panas yang baik, dapat menggemburkan tanah serta menyerap unsur hara dan kandungan silika yang terkandung di dalam tanah, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai lahan tanam. Ini digunakan sebagai bahan baku dan sumber energi dalam industri bahan bangunan. panas. Konduktivitas termal sekam padi 0,271 BTU, densitas curah 0,100 g/ml, densitas curah 1125 kg/m3, dan nilai kalor 3300–3600 kkal per kg sekam padi (Ridhuan, K dan Dwi, I, 2020).

Tanaman durian (Durio zibethinus Murr) merupakan salah satu jenis buah yang produksinya melimpah. Bagian buah yang dapat dimakan (persentase berat daging buah) relatif rendah, hanya 20,52%. Artinya sekitar 79,08% bagian berikut ini tidak layak dikonsum si. Kulit dan biji durian. Kulit durian tidak memiliki nilai ekonomi hanya menjadi merupakan limbah rumah tangga dan dibuang sebagai sampah. Kulit durian dapat digunakan sebagai bahan baku campuran durian karena mempunyai kandungan selulosa yang relatif tinggi (50-60%) dan kandungan lignin (5%), serta kandungan pati yang rendah (5%). Papan olahan dan produk kompresi lainnya (Ridhuan, K dan Dwi, I., 2020). Menurut Violet Hatta (2007), kulit durian mengandung selulosa 50-60%, lignin 5%, pati 5%, nilai kalor 3786,95 kal/gram, nilai kuat lentur 360 kg/cm2, nilai kuat putus 543 kg/ cm2. Kelapa (Cocos nucifera L.) merupakan tanaman serbaguna yang seluruh bagian tanaman ini memberikan bermanfaat bagi kehidupan manusia. Kelapa muda memiliki cangkang yang masih muda dan lunak. Saat ini batok kelapa muda masih berupa limbah dan belum banyak dimanfaatkan. Setelah ampas dan airnya dikonsumsi sebagai minuman, hanya dimanfaatkan sebagai limbah. Tempurung kelapa muda masih tergolong lunak dan memiliki komposisi lignin atau hemiselulosa yang jauh lebih rendah dibandingkan tempurung kelapa tua (Ridhuan, K dan Dwi, I., 2020). Kelapa muda terutama melindungi daging kelapa yang lunak. Cangkangnya berupa lapisan keras setebal 3-5 mm. Teksturnya yang keras disebabkan oleh tingginya kandungan silikat (SiO2) pada tempurungnya, yaitu sebesar 15-19% dari total berat buah kelapa. Komposisi senyawa penyusun tempurung kelapa : air 8,0%, abu 0,6%, senyawa larut pelarut organik 4,2%, lignin 29,4%, pentosan 27,2%, asam uronat 3,5%, selulosa 26,6%, metoksil 5,39%, nitrogen 0,11%. (Palungkun, 1993).

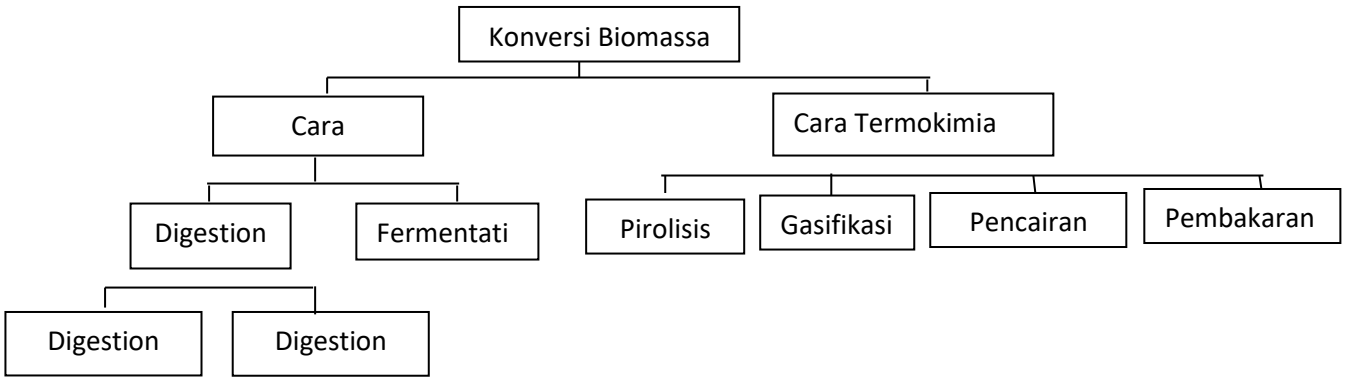
Karet atau memiliki nama latin Hevea brasilliensismerupakan tanaman asli dari lembah sungai amazon, brazil, amerika selatan. Tanaman dapat tumbuh baik di daerah daratan rendah yakni hingga ketinggian 200 m dari permukaan laut dengan kebutuhan sinar matahari minimum 5 -7 jam perhari. Karet mampu tumbuh hingga mencapai ketinggian 15 -25 m (Ridhuan, K dan Dwi, I., 2020). Secara fisik cangkang buah karet memiliki ciri ini sebagai tumbuhan yang berlignin. Konstruksi cangkang yang keras mengindikasi bahwa cangkang buah karet ini mengandung senyawa aktif berupa lignin yang cukup banyak, sehingga bagian ini cukup 42 Energi Terbarukan Pirolisis potensial untuk diolah menjadi produk karbon aktif yang sangat bermanfaat dan bernilai jual yang tinggi. Selain pemanfaatanya yang masih kurang optimal, jika dibandingkan dengan bagian buah lainnya. Cangkang karet mengandung lignin 33,54% untuk diolah menjadi peroduk karbon, selulosa 48,64%, pentosan 16,81%, kadar abu 1,25% dan kadar silika 0,52%.

Menurut Safitri (2010).Biomassa terdiri dari tiga komponen utama yaitu hemiselulosa, selulosa dan lignin. Karakteristik dari tiga komponen pokok biomassa itu adalah hemiselulosa terdekomposisi antara temperatur 220 –320 ^{o}C, selulosa terdekomposisi setelah hemiselulosa yaitu antara 250 –360 0C dan untuk lignin karena mempunyai sifat yang berbeda dengan dua komponen diatas sehingga terdekomposisi secara merata antara temperatur hemiselulosa dan selulosa terdekomposisi tetapi dalam jumlah yang sedikit yaitu antara temperatur 180 –500 ^{o}C (Shafizadeh, 1977). Selulosa adalah polimer yang dibentuk oleh kondensasi linier struktur heterosiklik molekul glukosa. Selulosa terdiri dari 100–1000 unit glukosa (Fengel dan Wegener, 1984). Selulosa terurai pada suhu 68°C (280°C) dan berakhir pada 300-350°C (°C) (Ridhuan, K dan Dwi, I., 2020). Hemiselulosa merupakan polimer yang tersusun dari beberapa monosakarida seperti pentosan ($C_5H_8O_4$) dan heksosana ($C_6H_{10}O_5$). Dekomposisi termal pentosan menghasilkan furfural, furan, dan turunannya, serta serangkaian asam karboksilat yang panjang. Dekomposisi termal heksosan terutama menghasilkan asam asetat dan kongenernya. Hemiselulosa terdegradasi pada suhu antara 200 dan 250°C (Ridhuan, K dan Dwi, I., 2020). Lignin adalah polimer kompleks dengan berat molekul tinggi yang tersusun dari unit fenilpropana. Senyawa yang diperoleh melalui pirolisis struktur dasar lignin berperan penting dalam aroma asap produk asap. Senyawa tersebut merupakan eter fenolik seperti fenol, guaiacol, syringol, serta homolog dan turunannya (Girard, 1992). Dekomposisi lignin dimulai pada suhu 300–350 °C dan berakhir pada 400–450 °C.

2.1 Konversi Biomassa

Di Indonesia yang merupakan negara tropis, laju dekomposisi (pelapukan) bahan organik tergolong tinggi sehingga bahan pembenah tanah organik alami yang digunakan lebih bersifat sementara (temporary). Saat ini telah mulai berkembang di dunia, penggunaan biochar/arang limbah pertanian sebagai bahan pembenah tanah alternatif. Biochar mampu bertahan lama di dalam tanah atau mempunyai efek yang relatif lama, atau relatif resisten terhadap serangan mikroorganisme, sehingga proses dekomposisi berjalan lambat (Tang et al. 2013). Beberapa tahun silam penduduk asli Amazon telah memberikan charcoal ke dalam tanah dan hingga saat ini (100-1000 tahun kemudian) terbukti bahwa kualitas sifat fisik dan kimia tanah tersebut jauh lebih baik dibandingkan dengan tanah sekitarnya (Steiner et al. 2007). Oleh karena itu, biochar dapat menjadi pembenah tanah alternatif yang potensial untuk memperbaiki kualitas lahan yang telah terdegradasi khususnya di lahan-lahan suboptimal.

Besarnya ukuran, kepadatan energi yang rendah, dan bentuk biomassa yang tidak sesuai merupakan faktor utama hambatan dalam proses conversi biomassa. Berbeda dengan gas atau cairan, biomassa tidak dapat ditangani, disimpan, atau diangkut dengan mudah. Ini memberikan motivasi utama untuk konversi biomassa padat menjadi cair dan gas bahan bakar, yang lebih padat energi dan dapat ditangani serta disimpan dengan relatif mudah. Konversi ini dapat dicapai melalui salah satu dari dua jalur utama (Basu, 2013).



Gambar 1. Konversi biokimia dan termokimia (Basu, 2013)

2.2. Konversi Biokomia

Konversi biokimia mungkin merupakan cara gasifikasi biomassa yang paling kuno. India dan Cina memproduksi gas metana untuk kebutuhan energi lokal melalui pencernaan mikroba anaerobik dari kotoran hewan. Di zaman modern, sebagian besar etanol untuk bahan bakar otomotif dihasilkan dari jagung dengan menggunakan fermentasi. Termokimia konversi biomassa menjadi gas terjadi jauh kemudian. Penggunaan gasifier biomassa kecil dalam skala besar dimulai selama Perang Dunia Kedua, ketika jumlahnya mencapai lebih dari satu juta unit sedang digunakan (Basu, 2013, Tawfik, 2024).
Dalam konversi biokimia, molekul biomassa dipecah menjadi lebih kecil molekul oleh bakteri atau enzim, Proses ini jauh lebih lambat daripada proses konversi termokimia tetapi tidak memerlukan banyak eksternal energi. Tiga rute utama untuk konversi biokimia adalah sebagai berikut:
1. Digestion (anaerobik dan aerobik)
2. Fermentasi
3. Hidrolisis enzimatik atau asam
(Basu, 2013)

Selain residu padat, produk utama pencernaan anaerobik adalah metana dan karbon dioksida. Bakteri menyerap oksigen dari biomassanya sendiri, bukan dari udara sekitarnya. Pencernaan aerobik atau pengomposan juga merupakan penguraian biokimia biomassa, kecuali hal ini terjadi dengan adanya oksigen. Ia menggunakan berbagai jenis mikroorganisme yang menyerap oksigen dari udara dan menghasilkan karbon dioksida, panas, dan pencernaan padatan. Selama fermentasi, sebagian biomassa diubah menjadi gula menggunakan asam atau enzim. Gula tersebut kemudian diubah menjadi etanol atau bahan kimia lainnya

dengan bantuan ragi. Lignin tidak diubah dan dibiarkan diubah menjadi bahan kimia melalui pembakaran atau termokimia. Berbeda dengan fermentasi anaerobik , produk fermentasi berbentuk cair.

2.3. Konversi Termokimia

Dalam konversi termokimia, seluruh biomassa dengan panas akan diubah menjadi gas sebagi hasil utama, yang kemudian disintesis menjadi bahan kimia yang diinginkan atau digunakan secara langsung Sintesis syngas Fischer Tropsch menjadi bahan bakar transportasi cair adalah contoh konversi termokimia. Produksi energi panas adalah yang utama, jalur konversi ini yang memiliki lima metode yaitu:
1. Pembakaran (Combustion)
2. Karbonisasi/torrefaksi
3. Pirolisis
4. Gasifikasi
5. Pencairan (Liquefaction).

Pembakaran melibatkan oksidasi eksotermik suhu tinggi (dalam suasana kaya oksigen) menjadi gas buang panas. Karbonisasi mencakup berbagai proses dimana kandungan karbon bahan organik meningkat melalui dekomposisi termokimia. Dalam pengertian yang lebih terbatas untuk biomassa, ini adalah sebuah proses untuk produksi arang dari biomassa dengan memanaskannya secara perlahan hingga suhu karbonisasi (500 900C) dalam atmosfer yang kekurangan oksigen. Torefaksi adalah proses terkait di mana biomassa malah dipanaskan ke suhu yang lebih rendah kisaran 200 300C tanpa atau sedikit kontak dengan oksigen. Berbeda dengan pembakaran, gasifikasi melibatkan reaksi kimia dalam suatu lingkungan kekurangan oksigen menghasilkan produk gas dengan nilai kalor.

3. METODE PIROLISIS

Secara Etimologi, Pirolisis berasal dari kata Piro (api), dan lysis (Penghacuran/perubahan), sehingga dapat diartikan dengan proses perubahan biomassa kepada bentuk yg berbeda dengan menggunakan api sebagai sumber panas, dengan keadaan oksigen terbatas, juga disebut dengan ermolisis, bila api dapat langsung membakar biomassa dan mengeluarkan panas disebut dengan teknik Klin kalua tidak langsung membakar biomassa disebut Retort (Nachenius et al., 2013; Hidayat *et al.*, 2018).

Proses pembentukan biochar yaitu dapat dilakukan melalui pirolisis atau pembakaran limbah organik tanpa oksigen (O2) pada suhu tinggi. Pirolisis adalah proses pembakaran yang bertujuan untuk penguraian senyawa organik secara termal dengan tekanan dan temperature tinggi tanpa adanya oksigen (O2), dengan temperatur pembakaran 400 0C sampai 800 0C dalam waktu 4 jam (Masthura, dan Zulkarnain P., 2018 Dalam Mokhtar et al., 2018) . Proses pembakaran melalui pirolisis yaitu dapat menghasilkan karbon (Biochar), cairan (Biooil), dan gas (Syngas). Karbon yang dihasilkan berasal dari penyusutan komponen sampel yang dipanaskan melalui penguraian senyawa organik. Sedangkan asap cair berasal dari kondensasi uap selama pembakaran berlangsung (Nazif et al., 2016 dalam Ridhuan *et al.*, 2018).

Tahapan proses perubahan senyawa organik pada biomassa selama proses pirolisis atau disebut dekomposisi biomassa adalah sebagai berikut:
1. Dekomposisi Selulosa. Mekanisme dekomposisi selulosa diidentifikasi oleh pengurangan derajat polimerisasi. Pada pirolisis lambat, dekomposisi selulosa terjadi pada waktu tinggal lebih lama dan laju pemanasan lebih sedikit, sedangkan pada pirolisis cepat, terjadi pada laju pemanasan tinggi melalui penguapan cepat yang menghasilkan levoglukosan. Selain produk padat berupa biochar, levoglukosan juga mengalami proses dehidrasi menghasilkan hidroksimetil furfural yang dapat terurai menjadi produk cair dan gas seperti bio-oil dan syngas. Selain itu, hidroksimetil furfural juga dapat melalui beberapa reaksi seperti 13 aromatisasi, kondensasi dan polimerisasi untuk menghasilkan biochar padat kembali. Dekomposisi selulosa terjadi sekitar suhu kurang dari 240 – 380 ^{o}C (Yaashikaa et al., 2020).
2. Dekomposisi Hemiselulosa. Hemiselulosa mengalami depolimerisasi membentuk oligosakarida, melalui serangkaian reaksi termasuk dekarboksilasi, penataan ulang intramolekul, depolimerisasi dan aromatisasi untuk menghasilkan biochar ataupun senyawa dekomposisi lainnya, seperti syngas dan bio-oil. Hemiselulosa mulai terdekomposisi pada suhu sekitar 200 - 290 ^{o}C tumpeng tindih dengan dekomposisi selulosa (Huang *et al.*, 2012).
3. Dekomposisi Lignoselulosa. Berbeda dengan mekanisme dekomposisi selulosa dan hemiselulosa, mekanisme dekomposisi lignin sangat kompleks. Mula-mula ikatan lignin β-O-4 putus sehingga menghasilkan radikal bebas. Radikal bebas ini menangkap proton dari spesies lain yang menghasilkan

pembentukan senyawa terdekomposisi. Radikal bebas berpindah ke molekul lain dan melakukan propagasi berantai. Dekomposisi lignin terjadi pada rentang suhu 280 – 500 ^{o}C.

Berat biochar berkurang seiring dengan peningkatan suhu, namun kandungan C dalam biochar meningkat, hal ini menyiratkan bahwa semakin tinggi suhu biochar akan semakin banyak mengandung C dan melepas unsur hidrogen (H) dan oksigen (O). Salah satu tujuan utama produksi biochar adalah untuk menghilangkan karbon dalam tanah, oleh karena itu kandungan karbon di dalam biochar bermanfaat dalam memaksimalkan jumlah penyimpanan karbon (Lee *et al.*, 2013).

3.1. Teknik Pembuatan Biochar

Pembuatan Biochar memiliki persamaan dan perbedaan dengan pembuatan arang, pembatan arang bertujuan sebagai sumber energi sehingga terdapat perlakuan untuk meningkatkan energi yang dihasilkan. Pembuatan biochar bertujuan untuk amandemen tanah dengan mempertahankan karbon untuk jangka yg panjang. Banyaknya senyawa karbon dengan cicin aromatik menjadikan biochar dapat bertahan ratusan tahun di dalam tanah (Prasetiyo et al., 2020; Hidayat *et al.*, 2018).
Alat pembakaran untuk menghasilkan biochar yang umum digunakan adalah drum sederhana tanpa pengatur suhu dan dengan pengatur suhu. Produksi biochar dengan alat-alat tersebut masih memproduksi emisi CO2 , namun belum ada data yang menunjukkan besarnya emisi tersebut. Hasil penelitian Adam (2009) di India dan Afrika Selatan telah mampu menghasilkan alat pembakaran berupa Retort dan Kiln yang lebih ramah lingkungan terutama dalam produksi emisi (Eco charcoal). Faktor emisi CO2 dari pembuatan charcoal dari Adam retort kiln adalah sebesar 641 g.kg-1 jauh lebih rendah dibandingkan bila dilakukan pembakaran biasa yaitu 1.370 g.kg-1 (Adam, 2009).

3.2.Teknik Retort

Pada teknik retort, merupakan pembakaran biomassa secara tidak langsung, ada 2 jenis yaitu retort terbuka dan retort tertutup atau juga disebut Roasting, seperti mana kopi yang di roasting menghasilkan banyak asam asam organik yg bermanfaat, demikian juga biomassa yg diroasting. alat yang digunakan adalah tabung besar dari tembaga yang dimodifikasi sangat ekslusif lalu menambahkan pembuatan asap cair dari pemanasan biomassa di dalam alat thermolisis. Setelah itu pemanasan menggunakan kompor gas akan mempercepat naiknya suhu tabung pirolisis, memanaskan biomassa sehingga menjadi biochar. Saat biomassa sudah kering, masukkan biomassa tersebut ke dalam tabung thermolisis dan dipanggang menggunakan sumber panas/ kompor dengan suhu tinggi dari bawah yang letakknya di atas tabung penyangga (Prasetiyo et al., 2020). Contoh alatnya dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2. Pirolisator dari drum (IPB) (Neneng *et al.*, 2015)



Gambar 3. Super BT01 (Laboratorium Biotan FP USU)

Teknik Klin

Teknik Kiln digunakan dalam pembuatan biochar dengan membakar langsung biochar dengan keadaan oksigen terbatas, dengan Alat Modern menggunkan Nitrogen sehingga memastikan tidak terjadinya proses oksidasi, secara sederhana dapat menggunakan tabung tertutup dengan cerobong asap atau dengan mengali lubang tanah dengan tujuan mereduksi oksigen pada proses pembakaran, Dapat menggunakan alat yang terbuat dari lempengan plat besi yang dimodifikasi berbentung drum dengan cerobong asap, penambahan kipas dan penutupnya diberi plat yang ditutup oleh penyatuan mor dan baut, biasanya alat ini dipakai untuk membakar semua jenis bahan biomassa. Biomassa dimasukkan ke dalam alat metode kiln apabila sudah dikeringkan, lalu dibakar dari atas dan kipas dinyalakan dari atas sehingga api turun ke bawah dan terbentuklah biochar (Prasetiyo *et al.*, 2020).



Gambar 4. Teknik Klin pada pembuatan Biochar sekam padi (Neneng *et al.*, 2015).

Kon-Tiki untuk produksi biochar dengan teknik Klin (pembakaran langsung pada biomassa) bisa dibuat dari plat besi yang berbentuk kerucut (cone) ataupun hanya dengan galian yang juga berbentuk kerucut (cone). Pembakaran dengan menggunakan Kon-Tiki dengan volume 2 m3 dapat menghasilkan 500 kg biochar,

dalam waktu 3 jam. Pembuatan biochar dengan metode Kon-Tiki yaitu pembakaran dengan sedikit asap. Pembakaran dilakukan secara bertahap, bahan pertama diletakkan sebagai sumber pengapian agar api dapat menyala. Ketika bahan tersebut sudah menyala sempurna, tambahkan kembali bahan lainnya, kemudian api dijaga agar tetap menyala. Proses tersebut dilakukan secara berulang hingga kapasitas Kon-Tiki terpenuhi. Proses dikatakan selesai jika sudah terbentuk lapisan abu pada bagian atas. Dari segi keamanan bagi lingkungan, Kon-Tiki dianggap relatif lebih baik karena konsentrasi CO dan NOx yang dihasilkan Kon-Tiki rendah. Proses pembakaran tanpa asap menjaga produksi bahan-bahan pencemar pada proses pembuatan biochar dengan Kon-Tiki selalu rendah (Jubaedah, 2014).



Gambar 5. Pembuatan biochar menggunakan Kontiki di KP Taman Bogo, Lampung Timur (Neneng *et al.*, 2015)

Metode Soil Pit merupakan Teknik Klin yang paling mudah untuk diterapkan pada petani yaitu membuat lobang pada tanah berbentuk kerucut kebawah dengan diameter bagian atas kira-kira 100 cm dan bagian bawahnya berdiameter kira-kira 60 cm serta dalam sekitar 100 cm. Metode soil-pit dipilih karena lebih mudah dan lebih murah karena tidak membutuhkan alat bantu dalam proses produksi biochar (Syahrinudin *et al*,, 2018).

Biochar merupakan sebuah bahan padat yang kaya akan karbon dan sebagai hasil konversi dari limbah atau sampah organik (biomas pertanian) melalui pyrolysis, sebuah pembakaran yang tidak sempurna atau pembakaran dengan suplai oksigen yang terbatas (Neneng L. Nurida *et al.*, 2015).
Perkembangan pemanfaatan biochar yang bersumber dari biomassa didorong oleh studi tentang tanah yang ditemui di Lembah Amazon, disebut Terra Preta (Lehmann *et al.*, 2003; Lehmann *et al.*, 2006). Tanah hitam Amazon merupakan tanah yang sudah tua, dikelola oleh bangsa Ameridian antara 500 dan 2500 tahun yang lalu. Tanah hitam ini mempertahankan kandungan karbon organik dan kesuburan yang tinggi, bahkan beberapa ribu tahun setelah ditinggalkan oleh penduduk setempat, sangat berbeda dengan tanah masam di dekatnya yang mempunyai kesuburan rendah. Kandungan bahan organik tanah dan hara yang tinggi disebabkan oleh kandungan karbon hitam yang sangat tinggi. Lehmann, (2007) menyatakan bahwa biochar telah terbukti bertahan dalam tanah hingga lebih 1000 tahun dan mampu mensekuestrasi karbon dalam tanah.

3.3. Modernisasi Alat Pembuat Biochar

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan biochar sebagai amandemen tanah pertanian yg potensial, maka banyak perusahan yg mengembangkan pembuatan biochar untuk skala besar dengan memperhatikan mutu dan kualitas biochar yang dihasilkan, juga hasil sampingan berupa cuka kayu, TER dan syngas, seperti gambar dibawah ini.



Gambar 6. Mesin pembuatan arang/biochar (Beston, 2024)



Gambar 7. Reaktor biochar YS (Sunrise, 2024)

4. SENYAWA BERACUN PADA BIOCHAR

Penurunan kelimpahan dan aktivitas mikroba diduga berhubungan dengan peningkatan retensi zat beracun, seperti logam berat, pestisida, dan pelepasan polutan dari biochar, seperti bio-oil dan hidrokarbon aromatik polisiklik. Beberapa ahli juga melaporkan bahwa biochar dapat bermanfaat bagi mikoriza tetapi juga dapat menghambat pertumbuhan tanaman. Beberapa faktor yang mungkin bertanggung jawab atas efek negatif biochar pada biota tanah, antara lain adanya bahan yang mudah menguap, sifat-sifat biochar dan munculnya unsur garam seperti Cl atau Na. Selain itu, beberapa biochar dapat menimbulkan risiko langsung terhadap biota tanah dan fungsinya (Ding *et al.*, 2016).

Aplikasi biochar un- tuk perbaikan lingkungan yang tercemar didasarkan pada kemam- puan biochar dalam menghilangkan polutan organik dan anorganik melalui proses adsorbsi dan degradasi senyawa polutan di dalam air. Biochar juga dapat digunakan untuk memurnikan udara dari gas karbon dioksida dan hidrogen sulfida. Pada polutan organik, hasil penelitian menunjukkan bahwa biochar dapat mengurangi kebutuhan oksigen kimia (COD) pada air limbah, senyawa aromatis, asam asetat, rodhamin B, senyawa fenol, limbah-limbah industri farmasi dan se- bagainya. Pada senyawa anorganik, biochar dapat mengurangi kon- sentrasi ion logam (PO43+, NH4+, As3+, Cd2+, Cr3+, Pb2+, Zn2+, dan Cu2+) pada pengolahan air limbah melalui proses adsorpsi. Aplikasi biochar pada bidang energi, khususnya penyimpanan energi antara lain sebagai bahan superkapasitor, material anoda pada produksi bat- erai, dan kabon fuel cell (Yaashikaa *et al.*, 2020).

Sohi *et al.*, (2009) mendefinisikan biochar sebagai residu padat yang kaya karbon, dihasilkan oleh dekomposisi termal biomassa dari tanaman, pada keadaan sedikit atau tanpa oksigen. Biochar merupakan biomassa yang telah dipirolisis pada kondisi lingkungan rendah atau tanpa oksigen yang diaplikasikan ke tanah pada tempat tertentu yang diharapkan untuk penyimpanan karbon secara berkelanjutan dan merangkap memperbaiki fungsi tanah pada manajemen saat ini dan masa depan sambil menghindari efek yang merugikan bagi lingkungan yang lebih luas dalam jangka pendek dan jangka panjang dan juga bagi kesehatan manusia dan hewan.
Hidrokarbon polisiklik aromatik (PAHs) dan senyawa organik mudah menguap (VOCs) terbentuk selama proses pembakaran biomassa. Senyawa-senyawa in bersifat toksik (fitotoksik) yang dapat mengkontaminasi tanah dan mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Konsentrasi dan komposisi PAHs tergantung pada jenis biomassa dan temperatur pembakaran. PAHs dapat terbentuk pada temperatur pembakaran yang rendah. VOCs juga diketahui terbentuk dalam konsentrasi yang tinggi pada temperatur rendah dan banyak pada temperatur yang tinggi. Polifenol hasil degradasi biomassa kayu berpotensi menjadi kontaminan pada beberapa biochar (Buss dan Ondrej, 2014).

PAH adalah senyawa organik yang tersebar luas di alam, bentuknya terdiri dari beberapa rantai siklik aromatik dan bersifat hidrofobik. Senyawa PAH mengandung dua atau lebih cincin benzene, berasal dari pirolisis, pembakaran yang tidak sempurna (pembakaran hutan, buangan motor, gunung api), proses pembakaran yang menggunakan suhu tinggi pada pengolahan minyak bumi, proses industri dan aktivitas manusia lainnya. PAH mengandung lebih dari 100 senyawa kimia berbeda yang terbentuk selama pembakaran tidak sempurna dari batubara, minyak dan gas, sampah, maupun zat-zat organik lainnya (McGrath *et al.*, 2007).
Proses pirolisis yang menghasilkan PAH melibatkan tiga faktor mendasar suhu tinggi, diantaranya yaitu berkurangnya kadar oksigen, dan bahan organic yang mengakibatkan pembakaran tidak sempurna. Proses ini umumnya menghasilkan campuran PAH yang kompleks, yang pada gilirannya dapat terakumulasi di lingkungan, mempengaruhi air, udara, dan tanah, sehingga memasuki rantai makanan (Abdel, 2016).

Hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH) adalah senyawa organik yang sebagian besar tidak berwarna, berwarna putih, atau kuning pucat padatan. Mereka adalah kelompok yang terdiri dari beberapa ratus senyawa yang berhubungan secara kimia, dan tidak ramah lingkungan dengan berbagai struktur dan toksisitas bervariasi. Senyawa ini beracun dan memiliki efek pada organisme melalui berbagai macam cara. Umumnya, PAH terdapat di lingkungan yang mengalami berbagai rute dan biasanya ditemukan sebagai campuran yang mengandung dua atau lebih senyawa (CCME, 2010). Karakteristik umum PAH adalah titik leleh yang tinggi dan titik didih (oleh karena itu padat), tekanan uap rendah,dan kelarutan dalam air yang sangat rendah. Karakteristik tersebut cenderung menurun dengan bertambahnya berat molekul sebaliknya, resistensi terhadap oksidasi dan reduksi meningkat (Masih, 2015).

5. SIMPULAN

Biochar merupakan bahan yg kaya akan karbon, merupakan salah satu solusi untuk mempertahankan karbon dalam jangka waktu yg cukup lama. Kualitas biochar sangat dipengaruhi oleh jenis bahan dan Teknik Pirolisi yag digunakan. Metode pembuatan biochar dengan pirolisis dan mempunyai 2 teknik yaitu Klin dan retort. Pemanasan pada teknik Kiln dengan menggunakan bionmassa itu sendiri, sedang Teknik retort diluar boiomassa. Tekni retort memiliki 2 cara, yaitu retort terbuka (roasting) dan retort tertutup. Biochar ternyata memiliki senyawa beracun seperti PAH dan Nitril sehingga penentuan Teknik Pirolisis sangat menentukan kualitas biochar yg dihasilkan.

References

Abdel-Shafy HI, Mansour. 2016. Tinjauan tentang hidrokarbon aromatik polisiklik: Sumber, dampak lingkungan, dampak. Oxford: Blackwell Publishing.

Adimihardja, Abdurachman. 2000. Teknologi Dan Strategi Konservasi Tanah Dalam Kerangka Revitalisasi Pertanian. Bogor: Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian.

Basu, 2013. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Published by Elsevier Inc.

Basuki, Marthen Pasang Sirappa, Betty Kadir Lahati, Nur Rahmah, Ramad Arya Fitra, Robiatul Adawiyah, Ranno Marlany Rachman, Hardiyanti YM, Elly Daru Ika Wilujeng, Religius Heryanto, Tri Mulya Hartati, Fajri Ikhsan, Nuraisyah Takdir, Benny Hidayat. 2023. Kesuburan tanah. Tohar Media

Beston. 2024. Daur Ulang Untuk Kehidupan yg Lebih Baik. https://indonesia.bestongroup.net/

Buss, W., Ondrej, M. 2014. Mobile organic compounds in biochar - A potential source of contamination-phytotoxic effects on cress seed (Lepidium sativum) germination. J Environ Manage. 137: 111-119.

CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). Canadian soil quality guidelines for potentially carcinogenic and other PAHs: scientific criteria document. CCME: Winnipeg: 2010.

Champagne, Elaine T. 2004. RICE : Chemistery and Technology. American Asociation of Cereal Chemists Inc. St. Paul, Minnesota,USA.

Ding, Y., Liu, Y., Liu, S., Li, Z., Tan, X., Huang, X., Zeng, G., Zhou,L., & Zheng, B. (2016). Biochar to improve soil fertility. A review. Agronomy for Sustainable Development, 36(2). https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z

F.Shafizadeh. 1977.Fuels from Waste(Eds L. L. Anderson and D. A. Tillman), Academic Press, New York.

Girard, J. P., 1992. Smoking dalam Technology of Meat and Meat Products, Clermont Ferrand Ellis Horwood, New York.P : 165-205

Hidayat B., A. Rauf., T. Sabrina., dan Ali, J. 2018. The potential of some biomass as biochar for heavy metal Adsorbent. Journal of Asian Scientific Research 2018. Vol 8, N0.11 293- 300.

Jubaedah. 2014. Teknologi Peningkatan Cadangan Karbon Lahan Kering dan Potensinya Pada Skala Nasional dalam Konservasi Tanah Menghadapi Perubahan Iklim. Jakarta : Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Kementerian Pertanian.

J. Masih, R. Singhvi, K. Kumar, V. K. Jain, A. Taneja, Aerosol Air Qual Res 12. 2012. 515–525.

Kartijono, N., E. Partaya,. Anggraito, Y., U. Christijanti, W. Marianti,. Arifin, M., S. 2021. Penerapan Konsep Terra Preta Untuk Meningkatkan Produktivitas Lahan Bagi Kelompok Tani (Kt) Green Village. Prosiding Semnas Biologi Ke-9. FMIPA Universitas Negeri Semarang : 67-76.

Lehmann, J., & Rondon, M. 2006. Biochar soil management on highly weathered soils in the humid wtropics. In Biological Approaches to Sustainable Soil Systems (Norman Uphoff et al Eds.). Atlanta: Taylor & Francis Group.

Lehmann, J., Gaunt. J. and Rondon M. 2006. Biochar sequestration in terrestrial ecosystem. A review, mitigation and adaptation strategies for global change, 11,403-427.

Masthura, dan Zulkarnain P., 2018," Karakterisasi Mikrostruktur Karbon Aktif Tempurung Kelapa dan Kayu Bakau", Elkawnie: Journal of Islamic Science and Technology Vol.; 4,(1)

Mokhtar A., Moh. Jufri, Herry S., 2018, "Perancangan Pirolisis Untuk Membuat Bahan Bakar Cair Dari Limbah Plastik Kapasitas 10 Kg", Jurnal SENTRA, hal.; 126-133, ISSN;2527-6042

Nachenius R.W, F. Ronsse, R.H. Venderbosch dan W. Prins. 2013.

Nazif R., Erlangga W., Halimatuddhaliana, 2016, "Pengaruh Suhu Pirolisis Dan Jumlah Katalis Karbon Aktif Terhadap Yield Dan Kualitas Bahan Bakar Cair Dari Limbah Plastik Jenis Polipropilena" Jurnal Teknik Kimia USU, Vol.5(3), hal.; 49-55.

Nurida, Neneng L., Rachman, A., & Sutono, S. 2015. Biochar Pembenah Tanah yang Potensial (Y. Soelaeman & J. Purnomo (eds.)). IAARD Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Nurida, N., L. 2014. Potensi Pemanfaatan Biochar Untuk Rehabilitasi Lahan Kering Di Indonesia. Jurnal Sumberdaya Lahan Edisi Khusus : 57-68.

Ridhuan K., Dwi I., Yulita Z., Nugroho A., 2018, "Pengaruh Cara Pembakaran Pirolisis Terhadap Karakteristik Dan Efisiensi Arang Dan Asap Cair yang Dihasilkan", Jurnal Seminar Nasional Teknologi Terapan, ISSN;2339-028X, hal.; 141-150

Rishuan, K. Dwi, I. 2020. Energi Terbarukan Pirolisis. CV. Laduny Alifatama. ISBN. 978-623-7311-73-7.

Palungkun,1993. Aneka produk Olahan kelapa. Penebar Swadaya. Jakarta

Pari dalam Esih Susi Safitri. 2010. Komposisi kimia cangkang buah karet. Jurnal Penelitian Karbon Aktif. Skripsi tidak diterbitkan. Indralaya: Universitas Sriwjaya.

PrescottCE, Blevins LL, dan StaleyC, 2004. Litter Decomposition in British Columbia Forests: Controlling Factors and Influences of Forestry Activities. Journal of Ecosystems and Management, 5(2): 44–57.

Prasetiyo Y, Benny H, Bintang S., 2020. Karakteristik Kimia Biochar dari Beberapa Biomassa dan Metode Pirolisis. Jurnal Agrium. Vol. 23. No. 1, hal; 17- 20. DOI: https://doi.org/10.30596/agrium.v23i1.5653

Smith RL, 1980. Ecology and Field Biology. Harper and Row Publishers, New York.

Sohi, S. P., E. Krull, E. Lopez-Capel, and R. Bol. 2010. A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. Advances in Agronomy, Volume 105. Elsevier Inc. DOI: 10.1016/S0065-2113(10)05002-9

Steiner, C., W.G. Teixeira, J. Lehmann, T. Nehls, J.L.V. de Macêdo, W.E.H. Blum, W. Zech. 2007. Long-term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. Plant soil 291: 275-290

Sunrise, 2024. biomass-charcoal-production. https://www.hnysmachinery.com/

Syahrinudin, S., Wijaya, A., Butarbutar, T., Hartati, W., Ibrahim, I., & Sipayung, M. 2018. Biochar Yang Diproduksi Dengan Tungku Drum Tertutup Retort Memberikan Pertumbuhan Tanaman Yang Lebih Tinggi. J Hut Trop, 2(1), 49–58.

[UNDP]. United Nations Development Program. 2012. Result Sheet: Application of biochar technology in Indonesia: Sequestering carbon in the soil, improving crop yield and providing alternative clean energy. BIOCHAR Project Indonesia. Jakarta (ID): UNDP

Tang, J., W. Zhu, R. Kookana, A. Katayama. 2013. Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. Journal of Bioscience and Bioengineering. 116(6), 653-659.

Tawfik A. Saleh, 2024. A review on the technologies for converting biomass into carbon-based materials: sustainability and economy, Bioresource Technology Reports, Volume 25

Violet, Hatta. 2007, Manfaat Kulit Durian Selezat Buahnya. Jurnal. Universitas Lambung Mangkurat.

Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Varjani, S., & Saravanan, A. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability, and applications for circular bioeconomy. Biotechnology Reports, 28, e00570. https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570