

Review: teknologi aktivasi fisika pada pembuatan karbon aktif dari limbah tempurung kelapa

Lia F. Ramadhani¹, Imaya M. Nurjannah¹, Ratna Yulistiani², Erwan A. Saputro^{1,*}

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

Jl. Raya Rungkut Madya Gunung Anyar, Surabaya 60249, Indonesia

²Program Studi Teknologi Pangan, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

Jl. Raya Rungkut Madya Gunung Anyar, Surabaya 60249, Indonesia

*Email: erwanadi.tk@upnjatim.ac.id

Abstrak

Tempurung kelapa dapat di tingkatkan nilai ekonominya dengan dijadikan sebagai karbon aktif. Sebelum dijadikan karbon aktif, tempurung kelapa dijadikan arang supaya mempunyai sifat lebih baik daripada bahan dasarnya. Karbon aktif merupakan arang yang telah dipadatkan melalui proses aktivasi, sehingga memiliki sifat daya serap yang lebih baik. Proses pembuatan karbon aktif melalui proses pirolisis yang dilanjutkan dengan proses aktivasi mampu memperbesar pori-pori pada arang tersebut sehingga meningkatkan daya serap. Ada beberapa macam teknologi aktivasi diantaranya aktivasi fisika dan aktivasi kimia. Studi literatur ini bertujuan untuk mengetahui teknologi aktivasi fisika beserta kelebihan dan kekurangannya, sehingga bisa menjadi acuan dalam pemilihan proses di pabrik aktivasi karbon. Aktivasi fisika merupakan proses aktivasi dengan cara memutuskan ikatan karbon dari senyawa organik pada suhu tinggi dan bantuan CO₂ dan uap. Gas-gas tersebut berfungsi untuk memperluas struktur pori-pori arang sehingga meningkatkan luas permukaannya, menghilangkan substansi yang mudah menguap, serta menghilangkan tar atau hidrokarbon pengotor pada arang. Aktivasi fisika memiliki kelebihan antara lain tidak menggunakan bahan kimia, biaya pembuatannya yang relatif lebih murah, waktu proses relatif lebih singkat dan yield arang yang dihasilkan lebih besar. Aktivasi fisika juga memiliki beberapa kekurangan seperti struktur pori arang yang dihasilkan kurang baik dan dalam prosesnya memerlukan suhu tinggi.

Kata kunci : Karbon Aktif, Tempurung Kelapa, Aktivasi Fisika, Pirolisis.

Abstract

The coconut shell could be economically increased by used as charcoal in the form of activated carbon. Charcoal is one of biomass energy source that has better properties than firewood. Activated carbon is a solid charcoal that has been processed further, so it is increase the absorption capabilities. The absorption process is occurred in the formation of pores in the charcoal due to the pyrolysis process. This process is followed by an activation process. There are two kind of activation, chemical and physical activation. The purpose of this study is to know the physical activation process including its benefits and drawbacks, so this could be as reference of process selection when construct the industry of activated carbon. Physical activation is the process of breaking the carbon chains of organic compounds with the help of heat, steam and CO₂. These gases function is to develop the structure of the cavity of the charcoal so that it expands its surface, removes volatile constituents, and removes the production of tar or impurities hydrocarbons on the charcoal. Physics activation has advantages such as not using chemicals, making costs are relatively cheaper, the processing time is relatively shorter and the yield of charcoal produced is greater. The activation of physics also has some disadvantages such as the structure of charcoal pores that are produced are not good and this process requires high temperatures.

Keywords: Activated Carbon, Coconut Shell, Physical Activation, Pyrolysis

1. PENDAHULUAN

Tanaman kelapa sebagai tanaman tropis merupakan tanaman komoditi yang bisa tumbuh subur di kebun, dipantai, atau di hutan Indonesia. Secara khusus, tanaman ini tumbuh di sepanjang pasir pantai dan secara umum dapat tumbuh di dataran tinggi serta lereng gunung. Tanaman kelapa (*Cocos nucifera L*) adalah tipe tumbuhan yang mempunyai bermacam macam kegunaan, hal ini karena sebagian besar dari tumbuhan tersebut dapat langsung di manfaatkan sebagai makanan maupun diolah terlebih dahulu untuk melengkapi kebutuhan makanan masyarakat Indonesia, sebagai contohnya adalah: gula kelapa, santan dan air kelapa segar, kelapa juga banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku industri (Saepulah,dkk. 2017). Daging buah dan air kelapa adalah sebagian dari buah kelapa yang bisa dimanfaatkan langsung sebagai bahan pangan dalam kehidupan sehari-hari, sedangkan tempurung kelapanya biasa dibuang begitu saja dan pemanfaatannya kurang. Kandungan kimia dari tempurung kelapa telah disusun di Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Kimia Tempurung Kelapa

Komponen	Presentase (%)
Selulosa	34
Lignin	27
Hemiselulosa	21
Abu	18

(Sumber: Tamado, 2012)

Pada tahun 1550 SM, berdasarkan sejarah Mesir Kuno yang ditulis oleh Hippo Crates dan juga Pliny The Elder telah dilakukan pengobatan dengan menggunakan karbon aktif dengan prinsip adsorpsi pada karbon berpori. Pada abad ke-18, karbon digunakan untuk pemurnian cairan. Karbon tersebut dibuat dari darah, kayu, dan hewan. Informasi pemakaian karbon aktif dalam awal abad ke-19 SM pada industri gula di Eropa, khususnya di Inggris memakai campuran kalsium fosfat dan karbon yang ditaruh disebuah tabung atau kolom dimana cairan gula kotor dilewatkan pada tabung atau kolom tersebut.

Sejarah juga mencatat bahwa pada awal abad ke-20 industrialisasi karbon aktif mulai berkembang dengan menggunakan bantuan uap dan bahan kimia. Proses pembuatan karbon aktif pada masa tersebut juga membuat karbon aktif bubuk (*powder*). Pada masa Perang Dunia I, aktivasi karbon aktif secara uap telah di kembangkan oleh Amerika dan di terapkan pada arang batok kelapa sehingga hasil akhir karbon aktif tersebut berbentuk granular. Inilah awal

perkembangan pemakaian karbon aktif pertama kali, hingga ditemukan pembuatan dengan skala industri, mulai dari aktivasi uap dan aktivasi kimia (Latief, 2015).

Arang mempunyai sifat lebih baik daripada kayu bakar sehingga disebut sebagai salah satu sumber energi biomasa, sehingga briket arang merupakan salah satu bahan bakar alternatif yang dapat diperbarui. Nilai ekonomis tempurung kelapa dapat ditingkatkan dengan menjadikannya sebagai arang yang kemudian diaktifkan menjadi karbon aktif. Karbon aktif merupakan arang yang telah di padatkan melalui proses aktivasi, sehingga memiliki sifat daya serap yang lebih baik. Proses pembuatan karbon aktif melalui proses pirolisis dan dilanjutkan dengan proses aktivasi mampu memperbesar pori-pori pada arang tersebut sehingga meningkatkan daya serap (Nurmayatri, 2013).

Berdasarkan bentuknya, karbon aktif dapat digolongkan menjadi tiga golongan yaitu karbon aktif granular, pellet, dan serbuk.

- Karbon aktif granular, yaitu karbon aktif yang memiliki ukuran partikel antara 0,2 sampai dengan 5 mm. Karbon aktif ini biasanya berbentuk tidak beraturan. Jenis karbon aktif ini bisa digunakan baik pada fasa gas maupun cair.
- Karbon aktif berbentuk pellet, yaitu karbon aktif yang mempunyai ukuran diameter dari 0.8 sampai dengan 5 mm. Karbon aktif ini dibuat melalui proses ekstrud dan berbentuk silinder kecil kecil. Karbon aktif ini mempunyai pressure drop nya rendah, kekuatan mekanik yang tinggi dan rendah kandungan abu sehingga biasanya digunakan untuk aplikasi pada fasa gas.
- Karbon aktif serbuk, yaitu karbon aktif yang memiliki ukuran kurang dari 0.18 mm (< 80 mesh). Karbon ini merupakan karbon aktif yang telah melalui proses penghancuran. Karbon aktif jenis ini biasanya digunakan pada aplikasi fasa cair dan penyaringan pada gas buang. (Sahrifirad, Rahmanpour dan Vahidifar, 2012).

Karbon aktif dapat dibagi menjadi dua tipe berdasarkan fungsinya, yaitu karbon aktif sebagai pemucat dan penyerap.

- Karbon aktif sebagai pemucat

Karbon aktif pemucat berfungsi untuk memindahkan zat-zat pengganggu yang tidak diinginkan, misalnya yang menghilangkan warna dan bau yang tidak diharapkan serta bisa membebaskan pelarut dari zat-zat pengganggu. Karbon aktif jenis ini biasanya digunakan di industri kimia dan industri baju. Bentuk karbon aktif ini adalah powder atau bubuk yang sangat

halus dengan diameter pori-pori lebih besar yang biasanya dibuat dari ampas pembuatan kertas, serbuk-serbuk gergaji, atau dari bahan baku yang mempunyai densitas kecil dan mempunyai struktur yang lemah.

b. Karbon aktif sebagai penyerap

Karbon aktif yang berbentuk granular atau pellet biasanya digunakan sebagai penyerap karena mempunyai sifat fisik yang keras dengan diameter pori lebih kecil. Karbon aktif yang digunakan sebagai penyerap uap difungsikan untuk memperoleh kembali pelarut atau katalis yang dipakai dalam pemurnian gas. Karbon aktif jenis ini dibuat dari tempurung kelapa, batu bata, tulang, atau bahan baku yang sifatnya keras.

Menurut Riadi (2017) kegunaan karbon aktif antara lain sebagai berikut:

- a. Pemurni gas, karbon aktif digunakan untuk desulfurisasi yaitu menghilangkan gas beracun, pencegahan racun, asap dan bau busuk.
- b. Penghilang rasa, warna, dan bau yang tidak dikehendaki pada minyak dan makanan.
- c. Sebagai pemercepat reaksi dalam berbagai reaksi kimia misalnya untuk mengkatalisa pembentukan sulfur klorida dari sulfur dioksida dan klorin, selain sebagai katalis dalam reaksi karbon aktif juga bisa sebagai promoter yang mempercepat laju reaksi.
- d. Pada Industri obat-obatan, karbon aktif juga digunakan sebagai bahan penyaring dan penghilang warna, bau serta rasa yang tidak dikehendaki.
- e. Pada industri minuman keras dan ringan, karbon aktif juga sebagai penghilang bau dan warna.
- f. Pada bidang perikanan, budi daya udang dan benur berguna untuk pemurnian air, menghilangkan logam berat, nitrit, amonia, serta fenol.
- g. Pada bidang kimia perminyakan digunakan dalam penyaringan bahan mentah atau zat antara.
- h. Pada sistem pengolahan air dan pengolahan air limbah, karbon aktif bermanfaat untuk menghilangkan atau menyaring zat warna, zat bau dan bahan pencemar.
- i. Pada proses pengolahan pulp and paper digunakan sebagai pemurni dan penghilang bau.
- j. Beberapa manfaat lainnya antara lain sebagai bahan penyerap, berbagai pelarut, crude oil, karet, larutan asam dan penghilang bau dalam kamar pendingin dan mobil.

Kualitas suatu karbon aktif dinilai berdasarkan persyaratan Standar Nasional Indonesia (SNI) 06-3730-1995 pada Tabel 2.

Tabel 2. Persyaratan Karbon Aktif Berdasarkan SNI 06-3730-1995

Jenis Persyaratan	Parameter
Kadar air	Maks 15%
Kadar abu	Maks 10%
Kadar zat menguap	Maks 25%
Kadar karbon terikat	Min 65%
Daya serap terhadap yodium	Min 750 mg/g
Daya serap terhadap benzena	Min 25%

(Sumber: Pusat Dokumentasi dan Informasi Ilmiah, LIPI 1995)

Industri karbon aktif dalam proses pembuatannya terdiri dari tiga proses yaitu, penghilangan air (dehidrasi), konversi bahan-bahan organik menjadi karbon (karbonisasi) serta dekomposisi dan perluasan pori-pori (aktivasi) (Dewi, Nurrahman dan Permana, 2009). Aktivasi merupakan suatu perlakuan terhadap arang yang sangat penting karena bertujuan untuk memperbesar pori yaitu dengan cara memecahkan ikatan hidrokarbon atau mengoksidasi molekul-molekul permukaan sehingga arang mengalami perubahan sifat, baik fisika maupun kimia, yaitu luas permukaannya bertambah besar dan berpengaruh terhadap daya adsorpsi. Oleh karena itu, tujuan penulisan artikel ini adalah untuk mengetahui lebih detail tentang proses aktivasi terutama aktivasi fisika beserta kelebihan dan kekurangannya, serta menjelaskan metode terbaik untuk aktivasi fisika.

2. PROSES PEMBUATAN KARBON AKTIF

2.1 Dehidrasi

Dehidrasi adalah proses pengurangan/penghilangan air yang terkandung dalam bahan dasar pembuat karbon aktif, hal ini bertujuan untuk menyempurnakan proses karbonisasi yang biasanya diproses dengan cara menjemur bahan baku tersebut dibawah sinar matahari langsung atau mengeringkannya dalam oven sampai diperoleh berat yang diinginkan. (Dewi, Nurrahman dan Permana, 2009).

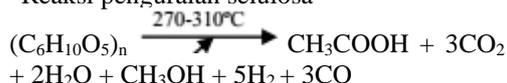
2.2 Karbonisasi

Proses karbonisasi adalah proses pembakaran bahan-bahan organik yang ada didalam bahan dasar pembuat karbon. Proses ini akan memicu terjadinya dekomposisi material organik dalam bahan baku dan akan

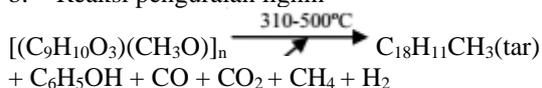
mengeluarkan zat-zat pengotor dalam bahan baku. Unsur-unsur non karbon sebagian besar akan hilang pada tahapan tersebut. Pengeluaran unsur yang mudah menguap ini menyebabkan terbentuknya pori-pori atau mulai terbukanya pori. Seiring dengan proses ini maka akan terjadi perubahan struktur pori (Shofa, 2012).

Penguraian bahan-bahan organik yang terkandung di dalam tempurung kelapa ini terjadi pada proses karbonisasi. Proses ini mempunyai beberapa tahapan proses. Pada awalnya, terjadi proses penguapan air pada suhu 100-120°C, kemudian terjadi proses penguraian selulosa menjadi larutan piroglinat gas kayu dan sedikit tar pada suhu 270-310°C, setelah itu terjadi proses penguraian lignin sehingga dihasilkan lebih banyak tar sedangkan larutan piroglinat dan gas CO₂ menurun. Kemudian gas CH₄, CO dan H₂ meningkat pada suhu 310-500°C, tahap pemurnian arang atau peningkatan kadar karbon terjadi pada suhu 500-1000°C. Menurut Maryono, Sudding dan Rahmawati (2013) reaksi yang terjadi pada proses karbonisasi yaitu:

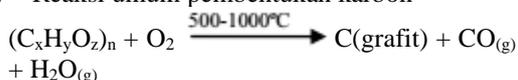
- a. Reaksi penguraian selulosa



- b. Reaksi penguraian lignin



- c. Reaksi umum pembentukan karbon



Konversi dari zat organik menjadi karbon atau residu yang mengandung karbon dapat dilakukan melalui 2 proses yaitu pirolisis dan karbonisasi (destilasi kering).

2.2.1 Pirolisis

Pirolisis disebut juga sebagai proses karbonisasi dengan pemanasan secara langsung dalam tungku *Beehive* yang berbentuk kubah. Secara umum pirolisis atau bisa di sebut thermolisis adalah proses penguraian suatu bahan baku pada suhu yang relatif tinggi dengan udara terbatas atau tanpa adanya oksigen. Proses dekomposisi/penguraian pada pirolisis ini biasa juga sering disebut dengan proses devolatilisasi (Ridhuan dan Suranto, 2016).

Proses pirolisis dilaksanakan pada suhu 350°C – 400°C dalam suatu reaktor dan diikuti dengan kondensasi dalam kondensor berpendingin air, sehingga dihasilkan asap cair Jamilatun (2013). Produk akhir proses pirolisis akan menghasilkan tiga senyawa yaitu gas, padat dan cair, yaitu karbon, cairan berupa campuran

tar (*bio-oil*) dan beberapa zat lainnya. Hasil samping proses pirolisis adalah gas berupa metana (CH₄), karbon dioksida (CO₂), dan beberapa gas lainnya dalam komposisi yang relatif kecil. Pada umumnya proses pirolisis berjalan pada kurun waktu 4-7 jam dengan suhu di atas 300°C, tetapi kondisi tersebut dipengaruhi oleh sifat fisik bahan baku (Ridhuan dan Suranto, 2016). Beberapa jenis proses pirolisis dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Jenis Proses Pirolisis (Aruan, 2013)

Proses	Produk		
	Cair	Arang	Gas
Pirolisis Cepat Temperatur 400-600°C Waktu tinggal uap panas pendek (<2 detik)	75%	12%	13%
Pirolisis Menengah Temperatur 500°C Waktu tinggal uap panas sedang	50%	25%	25%
Pirolisis Lambat Temperatur 350-400°C Waktu tinggal yang lebih lama	30%	35%	35%
Gasifikasi Temperatur tinggi 800°C Waktu tinggal yang lebih lama	5%	10%	85%

Adapun beberapa hasil penelitian pembuatan arang aktif menggunakan proses pirolisis adalah seperti penelitian yang telah dilakukan oleh Lestari, dkk (2017), disimpulkan bahwa waktu dan suhu pirolisis berpengaruh pada kualitas karbon aktif tempurung kelapa. Hasil pirolisis terbaik didapatkan pada waktu 5 jam dan suhu 325°C, yaitu daya serap iodine 477,83 mg/g, kadar air 2,04%, kadar zat mudah menguap 54,08%, kadar abu 0%, dan kadar karbon terikat 45,92% (Lestari, dkk., 2017).

Hasil penelitian lain menyatakan bahwa dari perbandingan proses pirolisis dan proses karbonisasi bahwa yang menghasilkan nilai kalor tertinggi adalah proses pirolisis. Pada pirolisis menghasilkan dua arang yang berbeda yaitu dari tabung pitot dan bahan bakar sedangkan karbonisasi hanya menghasilkan satu jenis arang saja (Ridhuan dan Suranto, 2016).

Di sisi lain hasil penelitian yang dilakukan oleh Budi, dkk (2012) menunjukkan bahwa karbon dari arang tempurung kelapa yang dihasilkan melalui proses pirolisis tempurung kelapa selama kurang lebih 6 jam pada suhu sekitar 70–100°C adalah karbon (C) dengan presentase kandungan berat sebesar 82.92 %-b.

Rout (2009), melakukan eksperimen pirolisis lambat secara *fixed bed*. Hasil dari arang, asap cair dan gas yang dihasilkan adalah 22-31%-b, 38-44%-b dan 30-33%-b yang masing-masing diperoleh pada kondisi pirolisis yang berbeda. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengaruh suhu pirolisis dan ukuran partikel pada hasil pirolisis lebih berpengaruh daripada laju pemanasan dan waktu tinggal (Rout, 2013).

Penelitian yang dilakukan oleh Rout (2013), didapatkan bahwa hasil arang maksimum 32%-b diperoleh pada suhu 450°C, dengan hasil samping cairan dan gas sebesar 38,6%-b dan 29,4%-b. Arang tempurung kelapa yang dihasilkan mengandung 3,73% moisture, 5,52% volatile, 19,65% abu, dan 71,55% *fixed carbon*. Sedangkan unsur-unsur yang terkandung didalamnya meliputi 75,5% atom C, 5,15% atom H, 4,14% atom N, 0,15% atom S, dan 15,06% atom O. Lalu dari analisis SEM arang tempurung kelapa yang dilakukan pada pembesaran 500X dan 1000X menunjukkan distribusi heterogen dari pori-pori dan tekstur kasar. Kehadiran mikropori dan mesopori juga terdeteksi (Rout, 2013).

Gabriel, dkk (2019) juga telah melakukan eksperimen pirolisis tempurung kelapa menggunakan *fixed bed reactor*. Eksperimen yang dilakukan menghasilkan yield arang tempurung kelapa tertinggi (39,2%) pada suhu 500°C yaitu sebesar 0.196 kg dengan kandungan 8,04db moisture, 13,24% volatile, 74,35% *fixed carbon*, dan 4,37% abu (Baygan, Loretero dan Manilhig, 2019).

Menurut Aruan (2013) terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi hasil pirolisis adalah:

- a. Waktu Pirolisis, yaitu waktu yang digunakan dalam proses pirolisis, waktu ini sangat mempengaruhi lama tidaknya kesempatan bereaksi. Semakin lama waktu reaksi maka semakin meningkatkan hasil akhir fase cair dan gas walaupun hasil fase padatan akan menurun. Waktu pirolisis ini sangat tergantung pada jenis dan jumlah bahan baku.
- b. Suhu pirolisis, yaitu suhu yang digunakan saat proses pirolisis. Suhu ini mempunyai pengaruh pada hasil akhir pirolisis, karena semakin meningkatnya suhu maka proses penguraian/dekomposisi semakin baik.
- c. Ukuran bahan, yaitu ukuran bahan yang akan diproses pirolisis. Ukuran ini sangat tergantung dari ukuran alat yang digunakan, hasil arang dan tujuan akhir pemakaian karbon aktif.
- d. Kadar air bahan, yaitu kandungan air di dalam bahan. Semakin banyak mengandung air

maka akan semakin banyak timbul uap air di dalam reaktor pirolisis sehingga waktu yang digunakan untuk pemanasan semakin lama dan juga akan menyebabkan tar sulit mengalami pengembunan di dalam pendingin.

2.2.2 Karbonisasi (Destilasi Kering)

Proses pembuatan karbon dapat dilakukan juga melalui metode “destilasi kering” atau bisa juga disebut sebagai pemanasan secara tidak langsung. Karbonisasi umumnya mempunyai arti pembuatan arang (Ridhuan dan Suranto, 2016). Karbonisasi atau pengarangan dapat juga diartikan sebagai proses pemanasan bahan-bahan organik pada suhu tertentu dengan batuan oksigen dengan jumlah yang sangat terbatas, biasanya dilakukan didalam furnace. Proses ini menyebabkan senyawa-senyawa organik yang terdapat di dalam bahan baku terurai dan membentuk hidrokarbon, uap, methanol, asam asetat, dan tar. Produk akhir karbonisasi yang tertinggal adalah dalam fase padatan yang biasa disebut karbon dalam bentuk arang berpori tetapi pori-pori tersebut masih kecil (Dewi, Nurrahman dan Permana, 2009).

Proses karbonasi pada umumnya dilaksanakan pada suhu 400 - 900°C, kemudian hasil dari proses ini didinginkan dan dicuci untuk menghilangkan dan mendapatkan kembali bahan-bahan pengaktif, setelah itu dilakukan penyaringan dan pengeringan. Pada proses suhu tinggi, diatas 170°C, akan menghasilkan CO₂, CO dan asam asetat. Pada suhu 275°C, dekomposisi menghasilkan metanol, tar dan hasil samping lainnya, sedangkan pembentukan karbon terjadi pada suhu 400-600°C (Nurdiansah dan Susanti, 2013).

Adapun beberapa hasil penelitian pembuatan arang aktif menggunakan proses karbonisasi memberikan hasil yang berbeda beda tergantung kondisi dan variable yang dilakukan. Penelitian Nurdiansyah dan Susanti (2013) menerangkan bahwa apabila suhu karbonisasi semakin tinggi maka nilai bilangan iodine, luas permukaan aktif, dan kapasitansi akan semakin turun. Pada penelitian ini keadaan optimum yang menghasilkan bilangan iodine, luas permukaan aktif, dan kapasitas karbonisasi terbesar untuk tempurung kelapa adalah pada temperatur karbonisasi 700°C dengan nilai 844 milifarad/gram. Arang yang dihasilkan mengandung 2,58% abu, 22,8% volatile, dan 74,62% *fixed carbon*.

Maryono, dkk (2013) melakukan proses karbonisasi dengan alat kiln drum dan sistem sedikit udara, yang bertujuan supaya pembakaran lanjutan pada tempurung kelapa tidak terjadi lagi

setelah pembakaran yang diinginkan terlampaui, sehingga diperoleh rendemen arang yang tinggi dan arang terbentuk sempurna hanya meninggalkan abu yang sedikit. Hasil akhir dari karbonisasi bahan baku sebanyak 70 kg tempurung kelapa selama 4 jam menghasilkan arang sebanyak 30% (21 kg).

Hasil penelitian lain menunjukkan bahwa semakin meningkatnya suhu karbonisasi akan menyebabkan rendemen karbon aktif semakin menurun sedangkan analisis kadar *fixed carbon* (FC) semakin meningkat. Pada penelitian ini menghasilkan karbonisasi dengan rendemen arang paling besar diperoleh pada waktu 1,5 jam dan suhu karbonisasi 450°C yaitu sebesar 28,448% (Nurisman, Miarti dan Sharul, 2017).

Yuliusman (2016) juga melakukan penelitian mengenai karbonisasi bahan tempurung kelapa dengan menggunakan furnace pada suhu 600°C selama 2 jam. Hasil dari proses karbonisasi tempurung kelapa massa awal dibandingkan massa akhir memiliki yields rata-rata sebesar 18,61%. Hasil tersebut memiliki yield yang cukup sesuai secara teoritis, dimana kadar karbon dalam tempurung 18,80% (Yuliusman, 2016).

Faktor-faktor yang mempengaruhi proses karbonisasi, yaitu suhu dan waktu karbonisasi. Suhu proses ini sangat berpengaruh pada rendemen karbonisasi. Semakin tinggi suhu, maka arang hasil karbonisasi akan semakin sempurna tetapi jumlah arang yang didapatkan semakin sedikit sedangkan hasil cairan dan gas semakin banyak. Hal ini disebabkan oleh makin banyaknya zat-zat terurai dan yang teruapkan. Disamping Suhu, waktu juga berpengaruh pada karbonisasi. Semakin lama waktu karbonisasi maka semakin lama reaksi sehingga reaksi lebih sempurna yang akan menyebabkan hasil arang semakin turun tetapi cairan dan gas makin meningkat. Waktu karbonisasi berbeda beda tergantung pada sifat fisik dan jumlah bahan baku yang dipakai (Turmuzi dan Syaputra, 2015).

2.3 Metode Aktivasi

Pada proses aktivasi terjadi pelepasan hidrokarbon, tar, dan senyawa organik yang melekat pada karbon tersebut. Aktivasi karbon aktif dapat dilakukan melalui 2 cara, yakni aktivasi secara kimia dan aktivasi secara fisika.

2.3.1 Aktivasi Kimia

Aktivasi kimia dapat diartikan sebagai proses pemutusan rantai karbon pada senyawa-senyawa organik dengan bantuan bahan-bahan kimia. Pada proses aktivasi kimia ini sangat dimungkinkan diperoleh luas permukaan yang

sangat tinggi, hal ini adalah salah satu keunggulan aktivasi kimia (Anggraeni dan Yuliana, 2015).

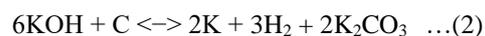
Bahan dasar yang mengandung lignoselulosa umumnya menggunakan aktivasi kimia. Pada proses aktivasi kimia, karbon hasil pembakaran dicampur dengan larutan kimia yang berperan sebagai *activating agent*. Larutan *activating agent* tersebut biasanya berasal dari logam alkali dan alkali tanah serta zat asam seperti KOH, H₂SO₄, ZnCl₂, H₃PO₄, dan NaOH (Shofa, 2012).

Setelah proses pencampuran, biasanya dilanjutkan dengan proses pengeringan dan pemanasan. Pada proses ini unsur-unsur mineral aktifator masuk di antara sela sela heksagon dari kristalit dan membuka permukaan yang mula-mula tertutup. Pada saat proses pemanasan dilakukan, senyawa kontaminan yang berada dalam pori-pori menjadi lebih muda terlepas. Proses pelepasan ini akan semakin mengaktifkan karbon dengan meningkatkan daya serap karbon aktif dan memperlebar luas permukaan (Dewi, Nurrahman dan Permana, 2009).

Salah satu kerugian aktivasi kimia adalah pada saat penggunaan bahan mineral. Kerugian ini disebabkan karena sulitnya proses penghilangan bahan-bahan mineral tersebut pada saat pencucian. Keuntungan menggunakan bahan mineral sebagai *activating agent* adalah pada waktu aktivasi yang relatif singkat, hasil akhir karbon yang lebih tinggi, dan meningkatkan daya adsorpsi (Anggraeni dan Yuliana, 2015).

Adapun beberapa hasil penelitian pembuatan arang aktif menggunakan proses aktivasi kimia adalah seperti pada penelitian Siti, dkk (2016) menggunakan larutan H₂SO₄ sebagai *activating agent*. Pemilihan asam sulfat dikarenakan asam sulfat memiliki sifat kimia yang lebih stabil dan lebih mudah didapatkan daripada *activating agent* yang lain. (Jamilatun, Salamah dan Isparulita, 2015).

Yuliusman (2016) melakukan penelitian tentang karbon aktif dari arang tempurung kelapa yang telah dikarbonisasi, kemudian diaktivasi kimia dengan menggunakan larutan KOH pada kondisi suhu 100°C. Reaksi yang terjadi ketika pencampuran karbon dengan larutan KOH disajikan pada persamaan (1), (2), dan (3).



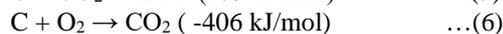
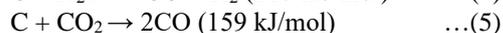
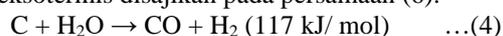
Activating agent dalam penelitian ini adalah KOH. Pada prinsipnya KOH yg ditambahkan akan menyebar ke permukaan karbon yang menyebabkan terjadinya oksidasi parsial pada

permukaan tersebut. Kemudian karbon akan bereaksi dengan oksigen menjadi CO₂ saat berlangsungnya proses aktivasi. Hal ini dibuktikan dengan terjadinya gelembung-gelembung yang keluar pada saat proses aktivasi dengan KOH dilaksanakan (persamaan 1 dan 2). Selain itu, oksidasi parsial pada karbon menyebabkan terbentuknya pori pada permukaan karbon sehingga dari pori tersebut akan membentuk struktur baru. Hasilnya karbon aktif yang telah diaktivasi memiliki luas permukaan 349.758 m²/g (Yuliusman, 2016).

2.3.2 Aktivasi Fisika

Aktivasi fisika dapat didefinisikan sebagai proses pemutusan rantai karbon dari senyawa organik dengan bantuan uap, panas dan CO₂. Proses aktivasi dengan cara fisika dapat dilaksanakan dengan menggunakan gas nitrogen, gas oksigen, gas karbon dioksida, dan air. Gas-gas tersebut berguna untuk memperbesar struktur rongga yang terdapat pada arang sehingga dapat meningkatkan luas permukaan arang/karbon. Sedangkan panas akan berfungsi untuk menghilangkan zat-zat pengotor yang mudah menguap dan membuang hidrokarbon-hidrokarbon pengotor pada arang (Anggraeni dan Yuliana, 2015).

Pada aktivasi dengan cara aktivasi fisika, diawali dengan memanaskan karbon pada suhu sekitar 800 – 1000°C kemudian karbon tersebut dialiri oleh gas pengoksidasi seperti oksigen, CO₂, atau uap air. Gas-gas tersebut akan bereaksi dengan karbon dan melepaskan karbon monoksida dan hidrogen. Pada waktu tersebut, senyawa-senyawa produk samping akan terlepas sehingga akan memperlebar pori dan meningkatkan daya adsorpsi. Gasifikasi karbon dengan uap air dan CO₂ terjadi melalui reaksi bersifat endotermis seperti pada persamaan (4) dan (5) (Marsh, 2006). Untuk aktivasi fisika dengan oksigen melalui reaksi bersifat eksotermis disajikan pada persamaan (6).



Pada metode aktivasi fisika, massa karbon juga mengalami pengurangan karena adanya perubahan struktur karbon. Salah satu kekurangan proses fisika ini adalah pada saat terjadi kelebihan oksidasi eksternal sewaktu gas pengoksidasi berdifusi pada karbon sehingga terjadi pengurangan ukuran adsorben (Shofa, 2012). Shofa (2012) juga menyatakan bahwa proses tersebut sulit dikontrol sehingga perlu diwaspadai.

Adapun beberapa hasil penelitian pembuatan arang aktif menggunakan proses aktivasi fisika adalah seperti penelitian Khuluk (2016) yang dikatakan bahwa hasil analisis morfologi dengan menggunakan SEM memperlihatkan bahwa susunan permukaan pada karbon aktif hasil aktivasi fisika relatif serupa apabila dibandingkan dengan karbon aktif hasil aktivasi kimia-fisika. Hasil ini mempunyai ukuran pori yang lebih besar daripada karbon aktif hasil aktivasi kimia (Khuluk, 2016).

Penelitian lain tentang pembuatan karbon aktif juga dilaporkan oleh Idrus (2013), yang menyatakan bahwa suhu aktivasi mempengaruhi kualitas pembentukan karbon aktif. Dari hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa kualitas karbon aktif yang terbaik diperoleh pada suhu 1000°C dengan kadar air 7,7%, kadar abu 0,84% dan daya serap terhadap kadar iod sebesar 586,318 mg/g (Idrus, Lapanporo dan Putra, 2013).

Pembuatan karbon aktif dari tempurung kelapa dengan aktivasi fisika juga telah dilakukan oleh Aryani (2019). Penelitian ini menyatakan bahwa hasil rendemen yang diperoleh sebesar 86,7%, kadar air 6,0%, kadar zat mudah menguap 37,12%, daya serap iodium sebesar 755,32 mg/g, dan kadar abu 8,46%. Setelah dibandingkan dengan aktivasi kimia, penelitian ini juga menyimpulkan bahwa arang aktif yang menggunakan metode aktivasi fisika mempunyai rendemen, kadar air dan kadar abu yang lebih tinggi tetapi mempunyai kadar zat yang mudah menguap yang lebih kecil daripada aktivasi kimia. Dalam hal penyerapan iodium, aktivasi fisika mempunyai daya serap Iodium lebih banyak jika dibandingkan dengan aktivasi dengan cara kimia. Penelitian ini juga merekomendasikan untuk menaikkan suhu operasi guna mendapatkan hasil yang lebih optimal dalam pembuatan arang aktif dengan cara aktivasi fisika (Aryani, Mardiana dan Wartomo, 2019). Masthura (2018) juga menyatakan beberapa kelebihan aktivasi fisika jika dibandingkan dengan aktivasi kimia, diantaranya: proses ini lebih ekonomis (biaya lebih murah), tidak memerlukan/ menggunakan bahan kimia. Metode aktivasi Fisika ini juga bisa diintegrasikan dengan metode aktivasi kimia untuk hasil yang lebih baik, tetapi akan memerlukan biaya yang lebih besar (Masthura, 2018).

2.3.3 Aktivasi Kimia-Fisika

Aktivasi kimia-fisika merupakan gabungan antara aktivasi kimia dan aktivasi fisika yang dilakukan melalui beberapa tahapan proses yang membuat proses lebih lama. Pada tahapan proses

ini, dilakukan perlakuan awal pada bahan baku hingga menjadi material berkarbon, kemudian material tersebut dicampurkan dengan aktivator kimia dalam suatu reaktor berpengaduk dalam kondisi yang telah ditentukan dan dilakukan pencucian setelahnya. Setelah itu proses dilanjutkan dengan aktivasi fisika, yaitu pemanasan karbon dengan kondisi proses tertentu yang dilakukan pada suatu reaktor panas seperti furnace atau kiln. Proses ini tergolong lama dan rumit, ditambah penggunaan alat yang relatif banyak (Suha, 2016).

Adapun beberapa hasil penelitian pembuatan arang aktif menggunakan proses aktivasi kimia-fisika adalah seperti penelitian yang dilakukan oleh Yuliusman (2016) tentang pembuatan karbon aktif dari tempurung kelapa dengan menggunakan aktivasi kimia dan aktivasi fisika. Aktivasi kimia dilakukan dengan larutan KOH pada temperatur ruang. Setelah itu dilanjutkan dengan aktivasi fisika pada temperatur reaktor 750°C. Dari penelitian tersebut diperoleh luas permukaan karbon aktif yang dihasilkan melalui aktivasi kimia dan fisika menghasilkan luas permukaan lebih tinggi dibandingkan aktivasi kimia saja. Karbon aktif aktivasi kimia memiliki luas permukaan 349.758 m²/g, sedangkan luas permukaan aktivasi kimia fisika yaitu 953 m²/g (Yuliusman, 2016).

Peneliti lain juga telah melakukan penelitian pembuatan arang aktif dari tempurung kelapa dengan aktivasi fisik dan aktivasi kimia dengan menggunakan aktivator KOH. Selang waktu karbonisasi adalah 2 jam dan suhu operasi pada 800°C. Penelitian ini juga melakukan variasi suhu dan lama proses aktivasi fisika, yaitu 4 jam dan 600°C. Setelah proses fisika, selanjutnya proses aktivasi dilanjutkan dengan proses aktivasi kimia dengan menggunakan KOH dengan perbandingan massa air:arang:KOH adalah 1:1:4. Hasil dari penelitian ini menyebutkan bahwa daya serap iodine atau adsorpsi arang aktif pada iodine memiliki nilai yang paling baik sebesar 1240.233 mg/g dengan luas permukaan 2352.851 m²/g yang terjadi pada konsentrasi KOH 20% arang aktif tempurung kelapa. Morfologi arang aktif dengan aktivasi KOH 20% memiliki struktur ukuran pori yang termasuk ke dalam struktur makropori, rata rata pori yang dihasilkan mempunyai tinggi 22.63 µm dan lebar 26.41 µm, (Yuningsih, Mulyadi dan Kurnia, 2016).

Menurut Goleman, Boyatzis dan Mckee, (2019) beberapa faktor yang mempengaruhi proses aktivasi yaitu waktu perendaman, konsentrasi aktivator, dan ukuran bahan.

a. Waktu perendaman.

Waktu perendaman adalah lama waktu yang diperlukan untuk merendam arang kedalam larutan activator. Waktu perendaman untuk bermacam-macam zat activator tidak sama sesuai dengan sifat dari aktovator tersebut. Proses ini berfungsi untuk menghilangkan atau membatasi pembentukan lignin, karena adanya lignin dapat membentuk senyawa tar.

b. Konsentrasi aktivator

Konsentrasi activator adalah kepekatan activator yang biasanya disebut dalam %berat. Semakin besar konsentrasi larutan aktivator maka semakin besar dan kuat pengaruh larutan tersebut mengikat senyawa-senyawa tar sisa karbonisasi untuk kemudian dikeluarkan melalui pori-pori dari karbon tersebut sehingga permukaan karbon semakin terbuka sehingga mengakibatkan semakin besar daya serap karbon aktif tersebut.

c. Ukuran bahan

Ukuran bahan adalah ukuran partikel bahan yang akan di aktivasi. Semakin kecil ukuran bahan maka semakin baik hasil aktivasi dari karbon tersebut.

3. PERBANDINGAN PROSES PEMBUATAN KARBON AKTIF

Dalam penelitian ini perbandingan proses pembuatan karbon aktif ditinjau dari proses karbonisasi dan aktivasi didapatkan berdasarkan pada analisis dari beberapa eksperimen dari peneliti rujukan. Hasil-hasil eksperimen dari berbagai peneliti dikelompokkan sesuai bahan kajiannya, setelah itu dilakukan seleksi proses untuk mendapatkan gambaran yang lengkap mengenai proses karbonisasi dan aktivasi.

3.1 Proses Karbonisasi

Jika dilihat dari hasil penelitian yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti didapatkan bahwa untuk pembuatan karbon aktif dalam tahap konversi bahan-bahan organik menjadi karbon (karbonisasi), untuk metode pirolisis hasil karbon yang dihasilkan lebih baik dari pada karbon yang dihasilkan dengan menggunakan metode karbonisasi.

Hal ini ditunjukkan dengan yield karbon yang dihasilkan dengan menggunakan metode pirolisis lebih besar dari pada menggunakan metode karbonisasi, lalu suhu yang diperlukan untuk metode pirolisis lebih rendah dibandingkan dengan metode karbonisasi, walaupun memang dalam prosesnya memerlukan waktu yang lebih lama. Untuk lebih jelasnya

perbandingan dari beberapa proses karbonisasi karbon aktif dapat dilihat pada Tabel 4.

Kelebihan dari proses pirolisis yaitu yield arang yang dihasilkan lebih tinggi dan suhu operasi lebih rendah, sedangkan kekurangannya adalah penggunaan pemanasan secara langsung maka peralatan yang digunakan lebih tahan terhadap api. Adapun kelebihan dari proses karbonisasi yaitu hasil samping tar dan gas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan kembali menjadi bahan kimia atau bahan bakar, sedangkan kekurangannya yaitu yield arang yang dihasilkan lebih rendah karena masih mengandung tar dan suhu operasi lebih tinggi.

3.2 Proses aktivasi

Jika dilihat dari hasil penelitian yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti didapatkan bahwa untuk pembuatan karbon aktif dalam tahap dekomposisi dan perluasan pori-pori (aktivasi), untuk metode aktivasi fisika hasil karbon aktif yang dihasilkan lebih baik dari pada karbon aktif yang dihasilkan dengan menggunakan metode aktivasi kimia dan juga metode aktivasi kimia-fisika.

Hal ini ditunjukkan dengan waktu yang diperlukan untuk metode aktivasi fisika relatif pendek dari pada metode aktivasi yang lainnya, lalu yield arang yang dihasilkan dengan metode aktivasi fisika juga lebih besar dari pada metode aktivasi lainnya, kemudian kualitas karbon aktif yang dihasilkan dengan metode aktivasi fisika juga terbilang cukup baik dengan hasil luas permukaan yang tinggi, serta bahan - bahan

pengoksidasi yang dipakai untuk aktivasi fisika mudah diperoleh dan dapat direycle kembali menjadi bahan pengoksidasi lagi. Meskipun begitu metode aktivasi fisika juga memiliki beberapa kekurangan seperti memerlukan suhu tinggi dalam prosesnya. Untuk lebih jelasnya adapun perbandingan dari beberapa proses aktivasi karbon aktif dapat dilihat pada Tabel 5.

4. KESIMPULAN

Dalam sintesis karbon aktif biasanya menggunakan proses pirolisis untuk memperoleh produk karbon dikarenakan yield arang yang dihasilkan lebih besar, suhu yang diperlukan lebih rendah meskipun membutuhkan waktu yang lama, karena jika semakin tinggi suhu yang digunakan maka arang yang terbentuk akan menjadi abu sebagian, sehingga yield arang yang dihasilkan akan rendah, tidak membutuhkan peralatan operasi yang banyak, karena hasil samping yang dihasilkan cenderung sedikit, dan proses yang dilakukan cukup mudah karena tidak memerlukan tekanan tinggi.

Berdasarkan review ini, secara garis besar dapat disimpulkan bahwa menggunakan steam untuk memperoleh produk utama karbon aktif memiliki banyak keunggulan, yaitu: waktu yang diperlukan relatif pendek, yield arang yang dihasilkan akan besar, tidak membutuhkan peralatan operasi yang banyak, proses yang dilakukan cukup mudah, bahan-bahan pengoksidasi yang dipakai untuk aktivasi dapat direycle kembali menjadi bahan pengoksidasi lagi dan lebih ekonomis.

Tabel 4. Perbandingan dari Beberapa Proses Karbonisasi Karbon Aktif

No.	Parameter	Pirolisis	Karbonisasi	Referensi
1.	Jenis pemanasan	Pemanasan dilakukan secara langsung	Pemanasan dilakukan tidak langsung	• Ridhuan dan Suranto (2016)
2.	Suhu	Memerlukan suhu lebih rendah (350°C – 400°C)	Memerlukan suhu lebih tinggi (400°C – 900°C)	• Pirolisis: • Ridhuan dan Suranto (2016) • Aruan (2013) • Karbonisasi: • Nurdiansah dan Susanti (2013)
3.	Waktu tinggal	Lebih lama	Relatif pendek	Pirolisis: • Lestari, dkk. (2017) • Budi, dkk. (2012) Karbonisasi: • Nurdiansah dan Susanti (2013) • Nurisman, Miarti dan Sharul (2017)
4.	Yield arang	35%	30%	Pirolisis: • Aruan (2013) Karbonisasi: • Rahmawati, Sudding dan Rahmawati (2013)

Tabel 5. Perbandingan dari Beberapa Proses Aktivasi Karbon Aktif

No.	Parameter	Aktivasi Kimia	Aktivasi Fisika	Aktivasi Kimia-Fisika	Referensi
1.	Suhu	Tidak memerlukan suhu tinggi	Memerlukan suhu tinggi (500°C-1000°C)	Memerlukan suhu tinggi (500°C-1000°C)	Aktivasi Kimia: <ul style="list-style-type: none"> • Nurisman, Miarti dan Sharul (2017) • Taer dkk. (2015) Aktivasi Fisika: <ul style="list-style-type: none"> • Idrus, Lapanporo dan Putra (2013) Aktivasi Kimia-Fisika: <ul style="list-style-type: none"> • Nurdiansah dan Susanti (2013)
2.	Waktu	Lama	Relatif pendek	Lebih lama	Aktivasi Kimia: <ul style="list-style-type: none"> • Nurisman, Miarti dan Sharul (2017) Aktivasi Fisika: <ul style="list-style-type: none"> • Idrus, Lapanporo dan Putra (2013) Aktivasi Kimia-Fisika: <ul style="list-style-type: none"> • Aryani, Mardiana dan Wartomo (2019) • Nurdiansah dan Susanti (2013) • Yuningsih, Mulyadi dan Kurnia (2016)
3.	Struktur pori	Baik	Kurang baik	Lebih baik	Aktivasi Kimia: <ul style="list-style-type: none"> • Taer dkk. (2015) Aktivasi Fisika: <ul style="list-style-type: none"> • Masthura and P (2018) Aktivasi Kimia-Fisika: <ul style="list-style-type: none"> • Yuningsih, Mulyadi dan Kurnia (2016)
4.	Luas permukaan	Cukup tinggi	Tinggi	Lebih tinggi	Aktivasi Kimia: <ul style="list-style-type: none"> • Yuliusman (2016) Aktivasi Fisika: <ul style="list-style-type: none"> • Khuluk (2016) Aktivasi Kimia-Fisika: <ul style="list-style-type: none"> • Yuliusman (2016)
5.	Yield	Cukup Besar	Besar	Kurang besar	Aktivasi Kimia: <ul style="list-style-type: none"> • Jamilatun, Salamah dan Isparulita (2016) Aktivasi Fisika: <ul style="list-style-type: none"> • Aryani, Mardiana dan Wartomo (2019) Aktivasi Kimia-Fisika: <ul style="list-style-type: none"> • Nurdiansah dan Susanti (2013)
6.	Kelebihan	Kualitas karbon aktif yang dihasilkan cukup baik	Tidak memerlukan bahan kimia	Kualitas karbon aktif yang dihasilkan lebih baik	
7.	Kerugian	Bahan-bahan kimia yang digunakan untuk aktivasi sulit dihilangkan saat pencucian	Seringkali terjadi kelebihan oksidasi eksternal sewaktu gas pengoksidasi berdifusi pada karbon sehingga terjadi pengurangan ukuran adsorben	Pada saat aktivasi kimia, bahan kimia yang digunakan untuk aktivasi sulit dihilangkan ketika pencucian, dan pada saat aktivasi fisika, suhu yang terlalu tinggi menyebabkan yield yang dihasilkan menjadi rendah	

DAFTAR PUSTAKA

- Anggraeni, I. S. dan Yuliana, L. E., 2015. Pembuatan Karbon Aktif dari Limbah Tempurung Siwalan (*Borassus Flabellifer L.*) dengan Menggunakan Aktivator Seng Klorida ($ZnCl_2$) dan Natrium Karbonat (Na_2CO_3). Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Aruan, T. R., 2013. Pembuatan Bio Oil dengan Bahan Baku Tandan Kosong Kelapa Sawit Melalui Proses Pirolisis Cepat dengan Kapasitas 12.000 ton/tahun. Universitas Sumatera Utara.
- Aryani, F., Mardiana, F. dan Wartomo, 2019. Aplikasi Metode Aktivasi Fisika dan Aktivasi Kimia Pada Pembuatan Arang Aktif dari Tempurung Kelapa (*Cocos Nucifera L.*). Indonesian Journal of Laboratory, 2(1), pp. 16–20.
- Baygan, G. D., Loretero, M. dan Manillig, M., 2019. Coconut Shell Pyrolysis for Optimum Charcoal Production. Proceedings of International Conference.
- Budi, E. Budi, E., Nasbey, H., Budi, S., Handoko, E., Suharmanto, P., Sinansari, R., & Sunaryo, S., 2012. Kajian Pembentukan Karbon Aktif Berbahan Arang Tempurung Kelapa. Seminar Nasional Fisika, pp. 62–66.
- Dewi, T. K., Nurrahman, A. dan Permana, E., 2009. Manufactured of Activated Carbon from Cassava Skin (*Mannihot Esculenta*). Jurnal Teknik Kimia, 16(1), pp. 24–30.
- Goleman, D., Boyatzis, R. dan Mckee, A., 2019. Karbon Aktif. Journal of Chemical Information and Modeling, 53(9), pp. 1689–1699. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Idrus, R., Lapanporo, B. P. dan Putra, Y. S., 2013. Pengaruh Suhu Aktivasi terhadap Kualitas Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa. Prisma Fisika, 1 (1), pp. 50–55. doi: 10.1371/journal.pone.0023032.
- Jamilatun, S., Salamah, S. dan Isparulita, I. D., 2015. Karakteristik Arang Aktif dari Tempurung Kelapa dengan Pengaktivasi H_2SO_4 , Variasi Suhu dan Waktu. Chemical, 2(1), pp. 13–19. doi: 10.26555/chemica.v2i1.4562.
- Khuluk, R. H., 2016. Pembuatan dan Karakteristik Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa (*Cocous nucifera L.*) Sebagai Adsorben Zat Warna Metilen Biru. Universitas Lampung.
- Khornia Dwi Lestari L.F, Rita Dwi Ratnani, Suwardiyono Suwardiyono, Nur Kholis, 2017. Pengaruh Waktu dan Suhu Pembuatan Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa sebagai Upaya Pemanfaatan Limbah Dengan Suhu Tinggi Secara Pirolisis. Inovasi Teknik Kimia, 2(1), pp. 32–38.
- Latief, Y. N., 2015. Sejarah Awal Karbon Aktif. Available at: <https://www.pasirsilika.com/2015/05/sejarah-awal-karbon-aktif-081322599149.html>.
- LIPI, 1995. SNI 06-3730-1995: Arang Aktif Teknis. Dewan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Maryono, Sudding dan Rahmawati, 2013. Preparation and Quality Analysis of Coconut Shell Charcoal Briquette Observed by Starch Concentration. Chemical, 14(1), pp. 74–83.
- Masthura dan P, Z., 2018. Karakterisasi Mikrostruktur Karbon Aktif Tempurung Kelapa dan Kayu Bakau Journal of Islamic Science and Technology, 4(1), pp. 45–54.
- Nurdiansah, H. dan Susanti, D., 2013. Pengaruh Variasi Temperatur Karbonisasi dan Karbon Aktif Tempurung Kelapa dan Tempurung Kluwak terhadap Nilai Kapasitansi Electric Double Layer Capacitor (EDLC). Jurnal Teknik Pomits, 2(1), pp. 13–18.
- Nurhayati, C., 2018. Pengaruh Temperatur Karbonisasi, Komposisi Campuran Arang Kayu Karet dan Lumpur Batubara terhadap Kualitas Biobriket. Prosiding Seminar Nasional I Hasil Litbangyasa Industri ISSN 2654-8550, pp. 48–56.
- Nurisman, E., Miarti, A. dan Sharul, A., 2017. Studi Eksperimental Pengaruh Suhu Karbonisasi pada Prototipe Electrical Carbonization Furnace (ECF) terhadap Rendemen dan Analisis Proksimat Karbon Aktif dari Limbah Tempurung Kelapa. Proceeding Seminar Nasional Pengelolaan Lingkungan.
- Nurmayatri, 2013. Morfologi Pori Karbon Aktif Berbahan Dasar Arang Tempurung Kelapa dengan Variasi Temperatur Aktivasi. Universitas Negeri Jakarta.
- Riadi, 2017. Karbon Aktif. Available at: <https://www.kajianpustaka.com/2017/09/karbon-aktif.html>.
- Ridhuan, K. dan Suranto, J., 2016. Perbandingan Pembakaran Pirolisis dan Karbonisasi pada Biomassa Kulit Durian terhadap Nilai Kalori. Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin, 5(1), pp. 50–56. doi: 10.24127/trb.v5i1.119.
- Rout, T. K., 2013. Pyrolysis of coconut shell. Rourkela, 211, p. 58. Available at: thesis.nitrkl.ac.in/5346/1/211CH1036.pdf.

- Saepulah A, Julita U, Yusuf T, Cahyanto T., 2017. Inovasi Produk Olahan Pangan melalui Pemanfaatan Limbah Organik Ampas Kelapa untuk Meningkatkan Ekonomi Masyarakat Kabupaten Bandung Jawa Barat. Available at: file:///C:/Users/Hp/Downloads/1480-3553-1-SM.pdf.
- Sharifirad M., Koohyar F., Rahmanpour S.H., dan Vahidifar M., 2012. Preparation of Activated Carbon from Phragmites Australis: Equilibrium Behaviour Study. Research Journal of Chemical Sciences ISSN 2277-2502 Vol. 1(8), 10-16.
- Shofa, 2012. Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Baku Ampas Tebu dengan Aktivasi Kalium Hidroksida. Universitas Indonesia.
- Tamado, D., Budi, E., Wirawan, R., Dwi, H., Tyaswuri, A., Sulistyani, E., & Asma, E., 2013. Sifat Termal Karbon Aktif Berbahan Arang Tempurung Kelapa. Universitas Negeri Jakarta.
- Turmuzi, M. dan Syaputra, A., 2015. Pengaruh Suhu dalam Pembuatan Karbon Aktif dari Kulit Salak (*Salacca Edulis*) dengan Impregnasi Asam Fosfat (H_3PO_4). Jurnal Teknik Kimia USU, 4(1), pp. 42–46.
- Yuliusman, 2016. Pembuatan Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa melalui Aktifasi Kimia dengan KOH dan Fisika dengan CO_2 . Seminar Nasional Teknik Kimia Soeboardjo Brotohardjono XII, (June), pp. 1–6.
- Yuningsih, L. M., Mulyadi, D. dan Kurnia, A. J., 2016. Pengaruh Aktivasi Arang Aktif dari Tongkol Jagung dan Tempurung Kelapa Terhadap Luas Permukaan dan Daya Serap Iodin. Jurnal Kimia Valensi, 2(1), pp. 30–34. doi: 10.15408/jkv.v2i1.